Wykorzystanie oprogramowania przeznaczonego dla systemów informacji geograficznej (GIS) w badaniach petrologicznych ksenolitów ultramaficznych i maficznych z Dolnego Śląska

Monika Nowak[1], Beata Marciniak-Maliszewska[2]



M. Nowak



B. Marciniak--Maliszewska

Use of specialized GIS software in petrological studies of ultramafic and mafic xenoliths from Lower Silesia. Prz. Geol., 73: 640–647; doi: 10.7306/2025.69

A b s t r a c t. The pandemic situation from years 2020–2023 forced the search for ways to perform remote analyses of the chemical composition of minerals using an electron microprobe (EPMA) and mass spectrometry (LA-ICP-MS). As a consequence of these circumstances, a new method for determining the coordinates of the so-called "benchmark points" in microscopic thin sections using ArcGIS software was developed. The solution used enabled more accurate planning of future analyses, faster location of analytical points and the collection of all information in the form of a coherent database.

Keywords: *petrology of mantle xenoliths, GIS, EPMA, LA-ICP-MS, benchmark points*

Postęp technologiczny oraz uwarunkowania geopolityczne ostatnich kilkunastu lat powodują, że systemy informacji geograficznej (GIS) rozwijają się w bardzo szybkim tempie. Tak szybki rozwój jest związany z potrzebą szerokiego zastosowania oraz dużego zapotrzebowania na oprogramowanie przeznaczone dla tych systemów. Oprogramowanie wykorzystywane przez GIS można podzielić na dwa główne typy: oprogramowanie komercyjne (np. ESRI ArcGIS, Geomedia, Global Mapper, Golden Softwer Surfer) oraz oprogramowanie niekomercyjne tzw. otwarte (np. QGIS, GRASS GIS, SAGA GIS). Oba typy oprogramowania mogą mieć swoje zastosowanie również w badaniach minerałów w mikroobszarze (badaniach petrologicznych, mikrostrukturalnych), co zostało zaproponowane ponad dekadę temu (Li i in., 2008; Tarquini, Favalli, 2010; Nowak i in., 2011) i jest nadal rozwijane (Asmussen i in., 2015; Berrezueta, Domínguez-Cuesta, 2016; Ustinov i in., 2022).

Szybki rozwój technologiczny odnotowuje się również w przypadku badań petrologicznych – głównie jeżeli chodzi o urządzenia służące do pomiaru składu chemicznego w mikroobszarze, np. mikrosondy elektronowej (*electron microprobe*, EPMA), skaningowego mikroskopu elektronowego (*scanning electron microscopy*, SEM), spektrometru masowego sprzężonego z plazmą wzbudzaną indukcyjnie z mikropróbkowaniem za pomocą odparowania laserowego (*laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*, LA-ICP-MS), lub też urządzenia pozwalające na szeroko pojętą identyfikację faz mineralnych, np. spektroskopia ramanowska czy system do dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (*electron backscatter diffraction*, EBSD). Oczywiście jednym z głównych zadań petrologów jest analiza występujących w skale minerałów w celu ich identyfikacji oraz określenia ich procentowej zawartości w skale.

Mimo że półautomatyczna metoda planimetryczna oparta na oprogramowaniu ArcGIS została również krótko opisana w tym tekście, to poniższy artykuł skupia się jednak na innym wyzwaniu, z którym mierzą się osoby zajmujące się petrologią, zwłaszcza te wykonujące badania w ośrodkach badawczych poza macierzystą uczelnią. Problemem tym jest szybka lokalizacja obszarów w różnego rodzaju preparatach mikroskopowych, które mają być poddane szczegółowym badaniom, zwłaszcza przy użyciu więcej niż jednej metody badawczej. Do identyfikacji obszarów o szczególnym znaczeniu najczęściej wykorzystuje się zdjęcia/skany całego preparatu, zdjęcia mikroskopowe wybranego obszaru w świetle przechodzącym lub też odbitym oraz zdjęcia BSE (*backscattered electrons*, elektrony wstecznie rozproszone). Nawigacja pomiędzy poszczególnymi obrazami potrafi być czasochłonna i wymaga od badacza wykonywania analiz pod presją czasu, głównie w celu ograniczenia kosztów eksploatacji specjalistycznego urządzenia pomiarowego. Niedawna pandemia COVID-19 wprowadziła dodatkowe utrudnienia – ograniczenia w poruszaniu się poza swoim miejscem zamieszkania, czyli praktyczny brak możliwości osobistego wykonywania badań w ośrodku zamiejscowym.

W prezentowanym artykule przedstawiamy rozwiązanie problemu organizacji i planowania badań laboratoryjnych wykonywanych w sposób zdalny, bez obecności osoby prowadzącej badania, dzięki zastosowaniom oprogramowania ESRI ArcGIS ArcMap 10.6, co pomogło usprawnić komunikację pomiędzy ośrodkami badawczymi znajdującymi się w Poznaniu, Warszawie i Krakowie. Na każdym etapie badań stosowano inny sposób wykorzystania wspomnianego oprogramowania. Jednocześnie głównym zadaniem było osiągnięcie jak najszybszej i najdokładniejszej lokalizacji punktów pomiarowych w badanych próbkach, wykorzystując technikę „mikro GIS".

[1] Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, ul. Bogumiła Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; mnap@amu.edu.pl; OCRID ID: 0000-0002-1112-2463

[2] Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; b.maliszewska@uw.edu.pl; ORCID ID: 0000-0001-9147-6693

METODYKA

Badaniom petrologicznym poddano ksenolity ultramaficzne i maficzne pochodzące z pięciu odsłonięć kenozoicznych skały bazaltoidowych z obszaru pomiędzy Złotoryją i Świerzawą. Ksenolitami perydotytowymi (i piroksenitowymi) w bazaltoidach nazywa się porwaki skał pochodzących pierwotnie z płaszcza litosferycznego lub też z granicy płaszcz litosferyczny–dolna skorupa (położonej na głębokości ok. 25–30 km). Ksenolity perydotytowe (ryc. 1 – patrz okładka) są często potocznie określane mianem bomb oliwinowych (Bartuś i in., 2019). Minerałami skałotwórczymi w opisywanych skałach są oliwiny (Ol), ortopirokseny (Opx) i klinopirokseny (Cpx). W ostatnich latach ukazało się wiele publikacji na ten temat (Matusiak-Małek i in., 2014, 2017, 2021; Puziewicz i in., 2020), ale tylko kilkanaście odsłonięć z ponad trzystu wystąpień bazaltoidów zostało przebadanych pod kątem ksenolitów.

Ze względu na charakterystykę petrograficzną próbek i specyfikę głównego problemu naukowego związanego z wahaniem składu chemicznego w minerałach skałotwórczych, niezbędne było zaprojektowanie z jak największą precyzją punktów pomiaru składu chemicznego w wyznaczonych kryształach. Istotna była również informacja zwrotna po wykonanych pomiarach: czy w przypadku punktów analitycznych doszło do ich „przesunięcia" względem projektowanego położenia i ewentualnie z jaką skalą przesunięcia mamy do czynienia.

Oznaczenie składu chemicznego pierwiastków głównych w minerałach skałotwórczych (Ol, Cpx, Opx) zostało wykonane przy wykorzystaniu mikrosondy elektronowej (EPMA) Cameca SX-100 w Laboratorium Mikroskopii Elektronowej, Mikroanalizy i Dyfrakcji Rentgenowskiej na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie. Badania zostały zaprojektowane jako analizy punktowe ułożone w profile pomiarowe z zadanym skokiem pomiędzy punktami: średni skok wynosił ok. 0,6 mm. Sumarycznie wykonano 110 profili badawczych o zmiennej długości –o d 1,35 mm do 36,5 mm, w 45 preparatach mikroskopowych (łącznie ok. 2250 analiz). Analizy przeprowadzono na jednym zestawie analitycznym pierwiastków, późniejsze ich rozdzielenie na Ol, Opx i Cpx oraz przeliczenia analiz tlenkowych na kationy wykonano półautomatycznie za pomocą arkuszy kalkulacyjnych Excel.

Analizy planimetryczne, czyli ustalenie procentowej zawartości minerałów skałotwórczych, przeprowadzono łącznie w 46 ksenolitach metodą opierającą się na digitalizacji zdjęć preparatów mikroskopowych, wykorzystując oprogramowanie ArcMap 10.6. Digitalizację przeprowadzono półautomatycznie, na podstawie zestawionych dwóch skanów całego preparatu wykonanych w świetle przechodzącym przy filtrach polaryzacyjnych, spełniających funkcje polaryzatora i analizatora, ustawianych w pozycji równoległej i skrzyżowanej. Skany wykonano zmodyfikowanym skanerem do przeźroczy ES-10 firmy *Olympus*. Rozdzielczość uzyskanych skanów wynosiła 2400 na 1600 pikseli. Oznaczenie składu mineralnego prowadzono na standardowych preparatach mikroskopowych o grubości ok. 25–30 μm oraz na preparatach grubszych niż 50 μm. Grubość preparatu wpływała na dwójłomność obserwowanych minerałów, podobnie jak przy klasycznych obserwacjach mikroskopowych i zmieniała ich barwy interferencyjne zgodnie z kartą Michela-Lév'yego. Utrudniało to rozróżnienie zwłaszcza piroksenów rombowych od jednoskośnych. W sytuacjach wątpliwych przy pracy na skanach mikroskopowych starano się zatem stosować dodatkową weryfikację mikroskopem polaryzacyjnym.

Oznaczenie składu pierwiastków śladowych zostało wykonane z wykorzystaniem spektrometrii mas sprzężonych z plazmą wzbudzaną indukcyjnie z mikropróbkowaniem za pomocą odparowania laserowego LA-ICP-MS w Laboratorium Geochronologii i Geochemii Izotopów w Instytucie Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Wykonano ok. 820 analiz w klinopiroksenach i ortopiroksenach w 50 preparatach mikroskopowych.

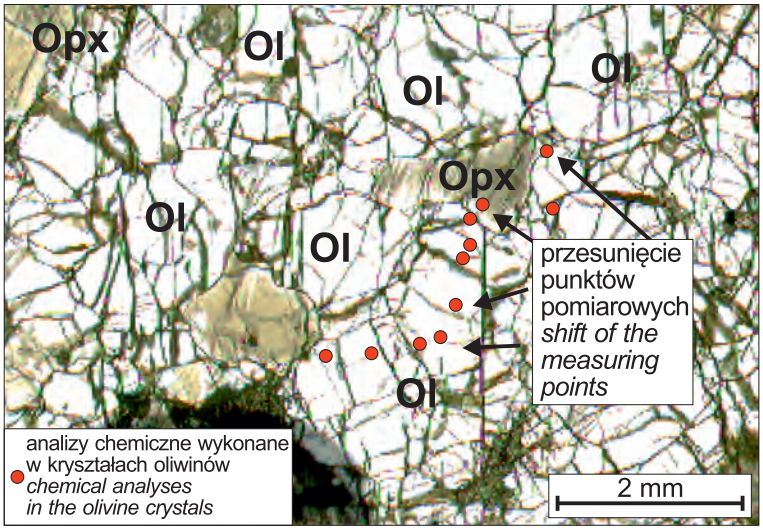
Wykorzystanie ESRI ArcGIS ArcMap 10.6 w przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych

Wcześniejsze próby wykorzystania oprogramowania ArcGIS ArcMap (ArcInfo) 9.2 w badaniach petrologicznych, w wersji automatycznej, zostały szczegółowo opisane przez Nowak i in. (2011). Wykorzystanie następnych wersji programu głównie (ArcGIS ArcMap 10.6), proponowanych przez ESRI, było możliwe dzięki stosowaniu podstawowych narzędzi obecnych w kolejnych wersjach programu.

Projektowanie profili pomiarowych oraz opracowanie otrzymanych wyników w trakcie badań na mikrosondzie elektronowej (EPMA)

Zdalne sesje pomiarowe przy użyciu mikrosondy elektronowej były prowadzone przez autorów okazjonalnie już wcześniej, np. w 2018 r. Głównym problemem technicznym tych badań była precyzyjna identyfikacja położenia punktów pomiarowych w stosunku do całego preparatu, tzw. georeferencjonowanie (*georeferencing*; https://www.-usgs.gov/faqs/what-does-georeferenced-mean). Georeferencjonowanie w przypadku obrazów rastrowych pochodzących z preparatu mikroskopowego wykonujemy przez geokodowanie (*geocoding*), czyli nadawanie współrzędnych x i y konkretnym trzem/czterem punktom, dalej w pracy określanych jako punkty reperowe (*benchmarks points*). Pierwotnie dla analiz mikrosondowych sprzed 2021 r. jako punkty reperowe wykorzystywano wybrane analizy naniesione najczęściej w sposób odręczny na zdjęcia BSE – niestety ten sposób powodował powstawanie przesunięć sięgających kilkuset mikrometrów (ryc. 2).

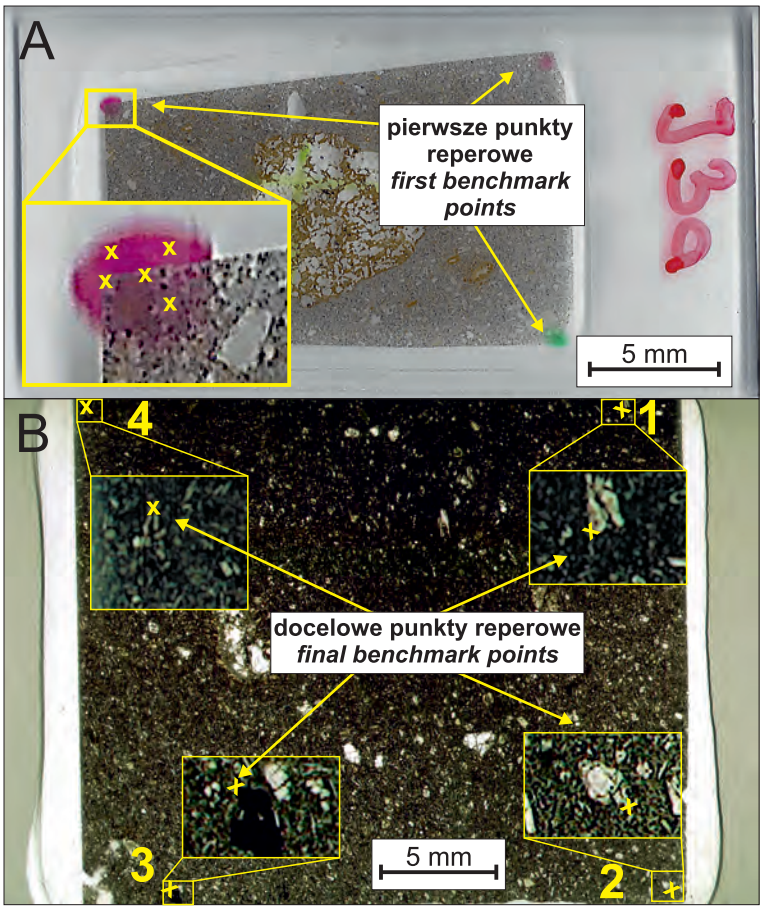
Dla skutecznej nawigacji w obrębie preparatu mikroskopowego istotne było precyzyjne określenie punktów reperowych dla badanych próbek. Tradycyjnie dla badań przy użyciu oprogramowania GIS są to minimum trzy, a przeważnie cztery punkty reperowe znajdujące się w narożnikach analizowanego obrazu rastrowego (https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.htm). Jako pierwsze zastosowano różnokolorowe punkty zaznaczone cienkopisem na szkiełku preparatu. Niestety ich identyfikacja w urządzeniu badawczym była utrudniona – poszukiwanie punktów na szkiełku zajmowało zbyt dużo czasu, poza tym miały one zbyt dużą jak na punkty referencyjne średnicę (ok. 1,5 mm). W trakcie ustalania punktu reperowego o średnicy ok. 1 μm w programie ArcGIS istniało zbyt dużo możliwych kombinacji rzeczywistych współrzędnych punktu. Później punkty reperowe, również zaznaczane przy pomocy kolorowych cienkopisów, starano się przesunąć na krawędź szkiełka i krawędź preparatu (ryc. 3A) – również w tym przypadku zastosowane rozwiązanie nie



←

Ryc. 2. Punkty z zaznaczonymi analizami wykonanymi przy użyciu mikrosondy elektronowej (EPMA). Pierwsze próby wykorzystania ArcMap do ustalenia rzeczywistej lokalizacji analiz (georeferencjonowanie preparatu mikroskopowego na podstawie zdjęć BSE). Wyniki analiz chemicznych wskazują, że analizowanym kryształem był oliwin. Brak odpowiednich punktów reperowych dla preparatu mikroskopowego powoduje przesunięcia punktów analiz o nieokreśloną liczbę mikrometrów. Analizy chemiczne dotyczące oliwinu (wskazane strzałkami) wypadają błędnie w obrębie ortopiroksenu. Ol – oliwin, Olx – ortopiroksen

Fig. 2. Points with marked analyses made using an electron microprobe (EPMA). First attempts to use ArcMap to determine the actual location of the analyses (georeferencing of the microscope preparation from BSE images). The results of the chemical analyses indicate that the analysed crystal is olivine. The lack of suitable benchmark points in the microscope thin section results in shifts of the analysis points by an unspecified number of micrometres. Chemical analyses for olivine (indicated by arrows) fall erroneously within orthopyroxene. Ol – oliwine, Olx – ortopiroxene



←

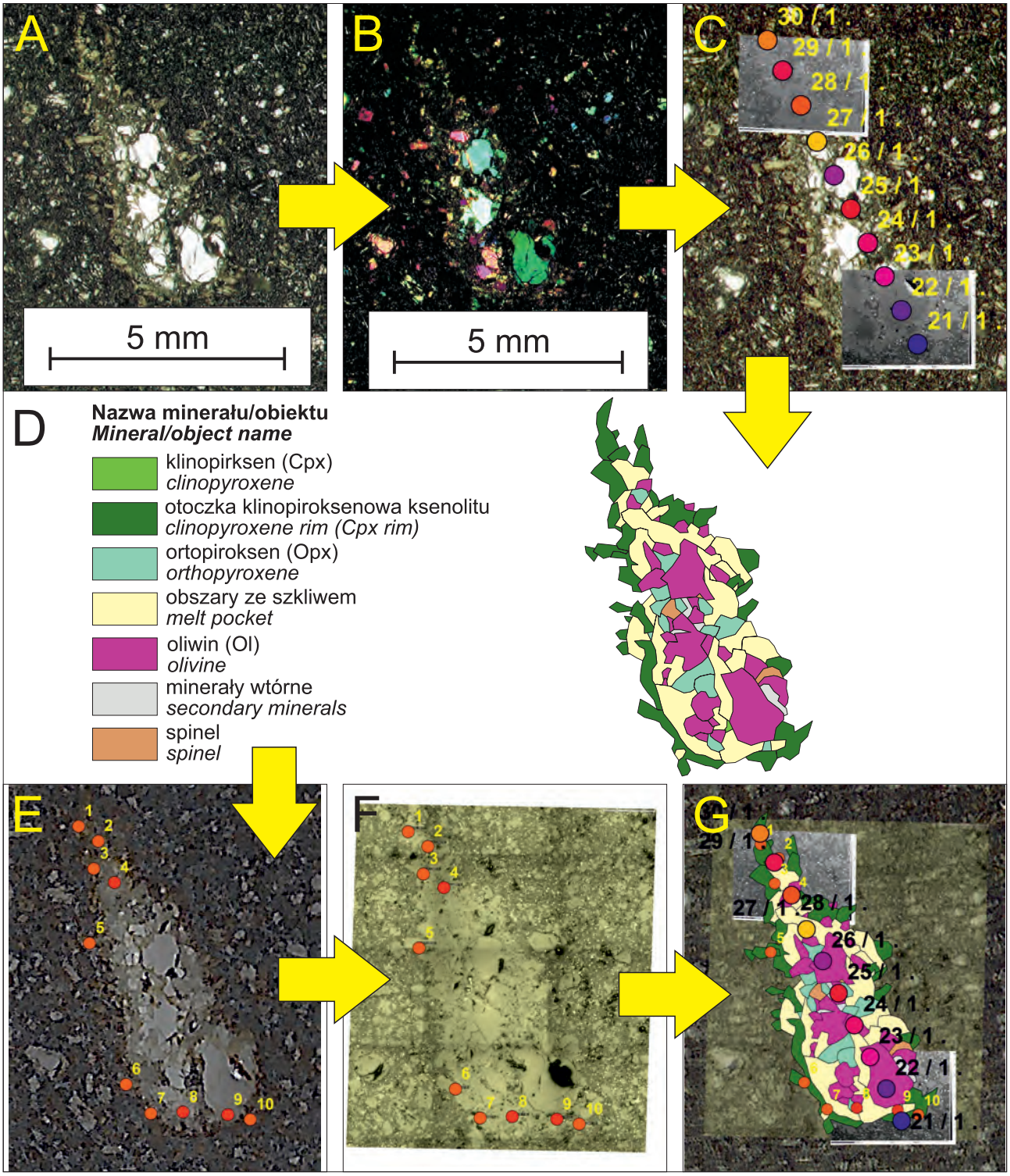
Ryc. 3. A – pierwsze próby ustalenia punktów reperowych; **B** – ostateczny sposób ustalania punktów reperowych, powiększone obszary pokazują krawędzie kryształów z zaznaczonym punktem referencyjnym (znak X)

Fig. 3. A – first attempts to establish the benchmark points; **B** – final method of establishing the benchmark points – enlarged areas show the edges of the crystals with the reference point marked (X sign)

przyniosło oczekiwanych rezultatów. Punkty nadal były zbyt duże (ok. 1 mm średnicy), by służyć jako dobre punkty referencyjne. Ponadto obraz w świetle spolaryzowanym na mikrosondzie zmieniał odcień barwy zaznaczonej cienkopisem, co utrudniało zorientowanie się, w którym dokładnie punkcie w danej chwili znajduje się wiązka elektronowa. Rozwiązaniem okazało się wybieranie czterech charakterystycznych miejsc w samym preparacie mikroskopowym (ryc. 3B). Ponieważ badane ksenolity wykazywały raczej małe rozmiary, najczęściej jako punkty reperowe stosowano charakterystyczne punkty styku ścian fenokryształów z otaczającego ksenolit bazaltu lub też charakterystyczne linie przecięcia spękań w oliwinach w samych ksenolitach (ryc. 3B).

Badania zdalne przebiegały w następujący sposób:

- ❏ w Poznaniu na całym skanie preparatu mikroskopowego były oznaczane punkty reperowe wraz z projektowanymi miejscami profili pomiarowych;
- ❏ w Warszawie na mikrosondzie elektronowej ustawiano zadany profil pomiarowy o zaprojektowanym skoku, jeżeli dany punkt profilu wypadał w miejscu, które się nie nadawało do analizy (np. naturalne spękanie w minerale, rysa czy wykruszenie powstałe w trakcie przygotowywania preparatu), jego położenie zostawało nieznacznie przesunięte. Wszystkie wykonane analizy, oprócz uzyskanych koncentracji pierwiastków głównych, miały automatycznie zapisywaną pozycję (współrzędne x i y) w wewnętrznym



Ryc. 4. Schemat budowania bazy danych wyników analiz chemicznych w mikroobszarze. **A** – skan cyfrowy preparatu mikroskopowego w świetle przechodzącym, polaryzatory równoległe; próbka zgeoreferencjonowana do układu EPMA; **B** – skan cyfrowy preparatu mikroskopowego w świetle przechodzącym, polaryzatory skrzyżowane; **C** – skan cyfrowy preparatu mikroskopowego w świetle przechodzącym (polaryzatory równoległe) razem ze zdjęciami BSE oraz miejscami analiz składu chemicznego; **D** – zdigitalizowana mapa rozmieszczenia minerałów w ksenolicie służąca do określenia procentowej zawartości składników w skale; **E** – skan cyfrowy preparatu mikroskopowego w świetle odbitym razem z naniesionymi miejscami planowanych analiz LA-ICP-MS; **F** – mozaika zdjęć wykonanych w trakcie analiz LA-ICP-MS wraz z zaznaczonymi miejscami tych analiz; **G** – wszystkie dane złożone w jedną bazę danych

Fig. 4. Flowchart for building a database of chemical microanalysis results. **A** – digital scan of the microscope thin section in transmitted light, parallel polarizers; sample georeferenced to the EPMA system; **B** – digital scan of the microscope thin section in transmitted light, crossed polarizers; **C** – digital scan of the microscope thin section in transmitted light (parallel polarizers) together with BSE images and locations of chemical composition analyses; **D** – digitized map of the distribution of minerals in the xenolith used to determine the percentage of components in the rock; **E** – digital scan of the microscope thin section in reflected light with marked locations for planned LA-ICP-MS analyses; **F** – mosaic of images taken during LA-ICP-MS analyses with marked locations of these analyses; **G** – all data compiled into a single database

układzie współrzędnych urządzenia EPMA. Dodatkowo zapisywano koordynaty x i y dla wybranych wcześniej punktów reperowych oraz zdjęcia BSE dla początku i końca profilu razem z zaznaczonymi punktami pomiarowymi. Lokalizacja położenia wybranych punktów reperowych nie stanowiła przeważnie dużych problemów;

- w Poznaniu uzyskane dane podlegały opracowywaniu kameralnemu. Wartości x i y punktów reperowych służyły do georeferencjonowania przez geokodowanie skanów cyfrowych do wewnętrznego układu współrzędnych ArcGIS, natomiast dane uzyskane z profili pomiarowych były transformowane za pomocą wewnętrznych narzędzi programu z formatu arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel (.xlsx) do pliku Shapefile typu punktowego (*point features*). Dzięki temu było możliwe ustalenie rzeczywistego położenia punktów pomiarowych w przestrzeni i ich stosunku do granicy ksenolit/skała bazaltoidowa lub innych stref występujących w ksenolicie.

Ilościowe określanie składu mineralnego w próbkach

Metoda półautomatyczna ustalania procentowej zawartości składników w skale (*modal composition*) przy użyciu oprogramowania ArcGIS została wprowadzona w 2011 r. jako kompromis przy niemożności uzyskiwania zadowalającego obrysu poszczególnych kryształów w sposób automatyczny (Nowak i in., 2011).

Pierwszym krokiem w tej metodzie jest dopasowanie do siebie przez georeferencjonowanie cyfrowych skanów mikroskopowych (ryc. 4A, B). W 2021 r. na potrzeby opisywanych badań metoda uległa pewnego rodzaju modyfikacji – krawędzie poszczególnych kryształów zostały zdigitalizowane (obrysowane) ręcznie, ale już po zgeoreferencjonowaniu obrazów mikroskopowych wg punktów referencyjnych dla EPMA (ryc. 4C). Dzięki temu do prawidłowej identyfikacji minerałów wykorzystano również dostępne zdjęcia BSE oraz wykonane analizy składu chemicznego (po przeliczeniu ich wg procedur mineralogicznych). Zwłaszcza analizy składu chemicznego odgrywały kluczową rolę w trakcie identyfikacji Cpx i Opx.

W trakcie digitalizacji obrazu cyfrowego skanów preparatów mikroskopowych wyodrębniono od 8 do 1561 pól na ksenolit, które zostały zapisane w formacie Shapefile typu pliku wielobocznego/poligonowego (*polygon features*). Liczba oraz wielkości pól zależała od struktury skały i wielkości minerałów danego ksenolitu (ryc. 4D). W celu przyspieszenia zadania i uniknięcia błędów typologicznych (nakładania się obrysowanych krawędzi kryształów na siebie) wykorzystano funkcję automatycznego zamykania wieloboków/poligonów (*autocomplete polygon*). Wyodrębnione pola zostały przypisane do dziewięciu klas obejmujących oprócz minerałów skałotwórczych (Ol, Cpx, Opx) również: tzw. obszary *melt pocket* (obszary ze szkliwem), minerały poboczne z grupy spineli i amfiboli, minerały wtórne, minerały powstałe w wyniku reakcji ksenolit–skała wulkaniczna oraz inne obszary (np. pustki i wykruszenia powstałe w trakcie szlifowania preparatu).

Przygotowanie próbek do badań LA-ICP-MS

Wykonano zestaw map preparatów mikroskopowych związanych z projektowanymi punktami analitycznymi. Mapy obejmowały zestaw obrazów w świetle spolaryzowanym (polaryzatory w postaci folii polaryzacyjnej ustawiono w pozycji równoległej – analogicznie do polaryzatora w mikroskopie polaryzacyjnym, i skrzyżowanej – analogicznie do analizatora) oraz w świetle odbitym (ryc. 4E). Przygotowane mapy obejmowały zarówno cały preparat mikroskopowy, jak i powiększenie wybranych obszarów. Łącznie wygenerowano 438 map (3–15 na próbkę).

W trakcie przeprowadzania badań w Krakowie wykonano zdjęcia analizowanych obszarów za pomocą kamery cyfrowej wysokiej rozdzielczości zintegrowanej z LA-ICP-MS, które zostały następnie połączone w mozaikę w programie zintegrowanym z laserem GEOSTAR (ryc. 4F). Liczba zestawionych zdjęć dla pojedynczego preparatu mikroskopowego wahała się od kilkunastu do nawet ponad 130 szt. Uzyskane obrazy, wraz z wynikami zawartości pierwiastków śladowych, zostały przekazane do Poznania. Prace kameralne nad otrzymanymi danymi polegały m.in. na integracji wszystkich wyników we wspólną bazę danych w ArcGIS (ryc. 4G). Obrazy uzyskane w trakcie analizy LA-ICP-MS zostały zgeoreferencjonowane do lokalnego układu współrzędnych ArcGIS zintegrowanego z danymi z EPMA.

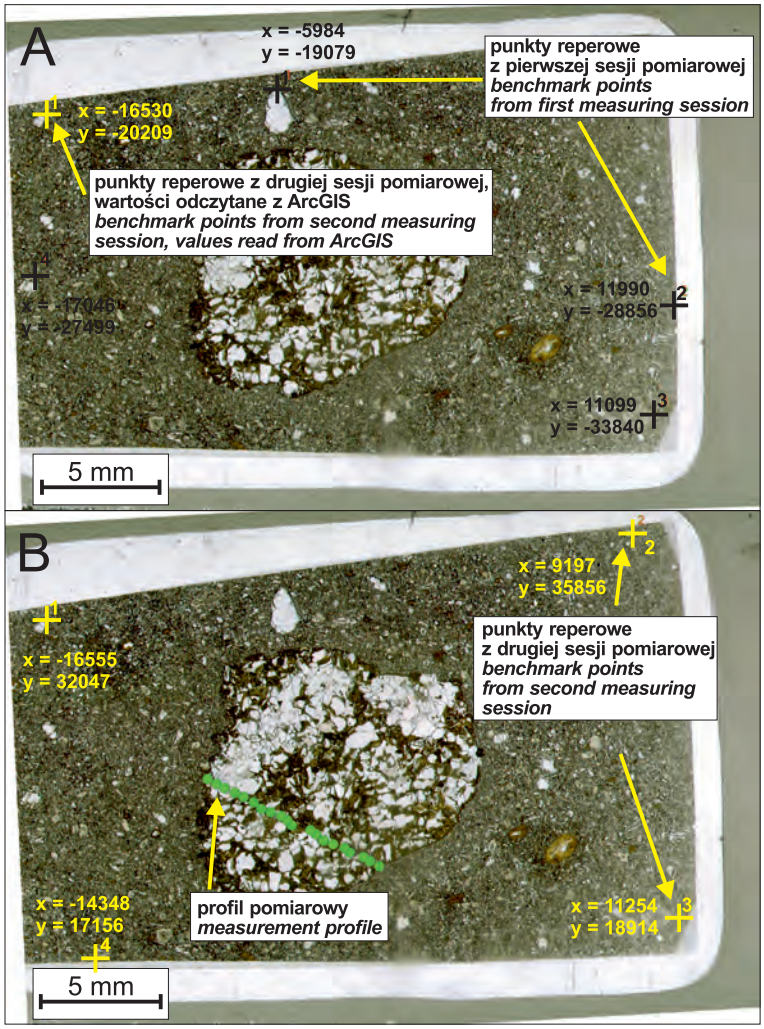
DYSKUSJA

Wyzwaniem, przed którym obecnie stoją badania petrologiczne, jest opracowanie szybkich sposobów obróbki i przetwarzania danych oraz ich magazynowanie w taki sposób, aby otrzymane wyniki były dostępne dla innych badaczy. Optymalizacja procesu przetwarzania danych, by były one spójne i łatwo dostępne, przy różnych „szkołach" petrologicznych wydaje się zadaniem trudnym do osiągnięcia. Istnieje powszechne przekonanie, że tylko tworzenie ogólnodostępnych petrologicznych baz danych daje możliwość szybkiego porównywania poszczególnych próbek skalnych. Obecnie istniejące bazy danych oparte na plikach tekstowych wartości rozdzielanych przecinkami (*comma separated values*) .csv nie są zbyt wygodne do przeszukiwania (Gard i in., 2019; https://georoc.eu/georoc/new-start.asp), jednak z drugiej strony format .csv pozwala na jego szybki import do różnego rodzaju oprogramowania, również do plików typu Shapefile. Klasyczne badania petrologiczne są czasochłonne i często wymagają wiedzy eksperckiej. Czy zatem wykorzystanie oprogramowania GIS jest ścieżką, która może prowadzić do przyspieszenia badań oraz ujednolicenia sposobu gromadzenia danych?

Odpowiedź na to pytanie nie jest jednoznaczna. Pierwsze próby wprowadzenia MIS (*Microscopic Information System*) w miejsce GIS przez Tarquiniego i Favalliego (2010) nie zaowocowały jego powszechnym użyciem, co było związane głównie z tym, że zaproponowany system koncentrował się na krawędziach ziaren, których automatyczne rozpoznawanie może stanowić duże wyzwanie (Nowak i in., 2011). Ze względu na argumenty przedstawione poniżej warto jest jednak pamiętać o różnorakich możliwościach, jakie daje oprogramowanie GIS również w badaniach petrologicznych.

Zalety wykorzystania oprogramowania GIS w przeprowadzonych badaniach petrologicznych:

1. Szerokie spektrum potencjalnych zastosowań oprogramowania GIS pozwalało wykorzystać je w zróżnicowany sposób w zależności od aktualnych potrzeb,



←

Ryc. 5. Proces importowania danych z różnych sesji pomiarowych EPMA, wybranych dla jednego preparatu. **A** – pierwsza sesja pomiarowa: kolorem czarnym zaznaczone punkty reperowe oraz ich współrzędne otrzymane z sesji EPMA; kolorem żółtym zaznaczony punkt reperowy z drugiej sesji pomiarowej oraz jego współrzędne obliczone w ArcGIS na podstawie współrzędnych punktów z pierwszej sesji pomiarowej; **B** – druga sesja pomiarowa: punkty reperowe oraz ich współrzędne otrzymane z sesji EPMA

Fig. 5. Process of importing data from different EPMA measurement sessions for a single thin section. **A** – first measurement session: black colour indicates benchmark points and their coordinates obtained from the EPMA session; yellow colour indicates a benchmark point from the second measurement session and its coordinates calculated in ArcGIS from the coordinates of the points from the first measurement session; **B** – second measurement session: benchmark points and their coordinates obtained from the EPMA session

np. do lokalizacji punktów pomiarowych, procentowego określenia zawartości składników w skale, wykonywania map porównawczych próbki (ryc. 4).

2. Ustalenie procentowej zawartości składników w sposób półautomatyczny umożliwia sprawdzalność oraz powtarzalność wyników, a przy tym znacząco ogranicza subiektywność oznaczeń, w przeciwieństwie do tradycyjnej mikroskopowej metody punktowej.
3. Ciągły dostęp do uzyskanych wyników i możliwość ich modyfikacji, również za pomocą darmowego oprogramowania (chociaż nie wszystkie narzędzia ArcGIS mogą być dostępne w innym oprogramowaniu).
4. Utworzenie baz danych przestrzennych, głównie w obrazie 2D, dla poszczególnych próbek umożliwia łatwiejszą integrację oraz interpretację otrzymanych wyników.
5. W opisywanych badaniach wykorzystanie oprogramowania ArcGIS niewątpliwie przyspieszyło cały proces przygotowania próbek do analiz chemicznych prowadzonych przez osobę przebywającą poza laboratorium badawczym, zwłaszcza na etapie przygotowania próbek do badań LA-ICP-MS po wykonanych już analizach EPMA.

Do wad stosowanego oprogramowania trzeba zaliczyć:

1. Problem z wdrożeniem dla osób, które nie miały do tej pory do czynienia z tego typu oprogramowaniem, ze względu na mnogość narzędzi i możliwych zastosowań programów GIS.
2. Możliwe zmiany interfejsu użytkownika w kolejnych wersjach programu, co powoduje zmiany w dostępie do narzędzi i wymaga czasu na zaznajomienie się z tymi modyfikacjami.
3. Dość znaczna czasochłonność procesu, zwłaszcza jeżeli chodzi o półautomatyczne ustalanie procentowej zawartości poszczególnych składników metodą planimetryczną (zdigitalizowanie całej próbki, mimo zastosowania funkcji *autocomplete poligon*, bardzo przyspieszającej cały proces, zajmuje od kilku godzin do nawet kilku dni, w zależności od stopnia zróżnicowania skały oraz wielkości badanej próbki).
4. Brak możliwości swobodnej modyfikacji układów odniesienia w stosunku do różnych urządzeń lub kolejnych sesji pomiarowych, w których ułożenie preparatu mikroskopowego jest zmienne (ryc. 5).

Wykorzystanie programu ESRI ArcGIS 10.6 lub innych tego typu w celu obróbki danych petrologicznych jest typowym rozszerzaniem aplikacyjności wykorzystywanego oprogramowania oryginalnie przeznaczonego do innego celu.

Na potrzeby badań ksenolitów ze skał bazaltoidowych możliwości programu ESRI ArcGIS 10.6 przystosowano w celu: usprawnienia nawigacji w preparacie mikroskopowym, określenia procentowej zawartości składników budujących skałę oraz zbudowania jednorodnej bazy danych mineralogicznych i chemicznych odnoszących się do zmienności składu chemicznego w badanej próbce.

Pierwsze zastosowanie, czyli usprawnienie nawigacji w obrębie preparatu mikroskopowego, połączone z dokładną lokalizacją wykonanych punktowych analiz geochemicznych sprawdziło się w pełni. Największy problem stanowiło przeliczanie współrzędnych pochodzących z różnych sesji pomiarowych lub różnych urządzeń (ryc. 5). Przeliczanie to jest możliwe jedynie dla osobnych plików ArcGIS, w których koordynaty punktów reperowych zostaną wpisane ręcznie, a wewnętrzny układ lokalny ArcGIS będzie dostosowany do danej sesji pomiarowej lub sesji na innym urządzeniu.

Aktualnie autorka wraz z zespołem prowadzi prace nad zaprojektowaniem „kalkulatora" do przeliczania współrzędnych poszczególnych punktów pomiarowych w oparciu o ustalone cztery stałe punkty reperowe w preparacie mikroskopowym.

Drugie z prezentowanych zastosowań, czyli procentowe określanie zawartości składników w próbce skalnej na podstawie ręcznego obrysowywania granic kryształów, może być metodą bardzo czasochłonną, przez co mało efektywną. W dobie tak szybkiego rozwoju sposobów analizy obrazu oraz uczenia się maszynowego (*machine learning*; Berrezueta, Domínguez-Cuesta, 2016; Nowosad, Stepinski, 2022; Körber, 2023; Naseri, Nasab, 2023; Petrelli, 2024) czy lepszego dostępu do nowoczesnych technik pomiarowych (SEM lub EBSD dla całych preparatów mikroskopowych), metoda ta wydaje się przestarzała. Oprócz zaprezentowanego w trakcie prezentacji online, w czerwcu 2024 r. serwisu firmy Zeiss (Arivis: https://www.arivis.com/products/cloud-ai), autorom nie są znane inne systemy bazujące na sztucznej inteligencji i oferujące podobne możliwości. Arivis jest systemem testowym, warunki dostępu do niego są niejasne i dodatkowo dopiero „uczy się" on rozpoznawania minerałów w obrazach mikroskopowych, natomiast wszystkie inne sposoby zaproponowane w ostatnim czasie wymagają od użytkownika choć minimalnych umiejętności programistycznych (Nowosad, Stepinski, 2022; Naseri, Nasab, 2023). Dostęp do programów rozpoznających procentowy skład mineralny na podstawie badań SEM lub EBSD jest w Polsce nadal ograniczony i wiąże się z dużymi nakładami finansowymi. Wbrew pozorom takie badania są również czasochłonne – wykonanie planimetrii całego preparatu może zajmować nawet kilka godzin pracy urządzenia. Biorąc pod uwagę powyższe aspekty, dochodzimy do wniosku, że wykorzystanie technik GIS w badaniach petrologicznych, może być alternatywą dla innych metod.

Na koniec odnieść się należy do trzeciego z proponowanych rozwiązań, czyli utworzenia jednolitej bazy ze wszystkimi danymi zgromadzonymi w jednym miejscu. Właściwie jest to główne zadanie geograficznych systemów informatycznych. Tak jak doskonale sprawdza się ono do sporządzania złożonych map dla całej Ziemi (Nowak, Muszyński, 2020) czy też Marsa (Pieterek i in., 2024), może mieć również szerokie zastosowanie dla mikroobszaru. W przypadku prac kameralnych dotyczących opisywanego projektu, zastosowanie jednolitej bazy danych dla zmienności chemicznej badanych minerałów w znaczący sposób skróciło czas opracowywania uzyskanych wyników.

PODSUMOWANIE

Pandemia COVID-19 wprowadziła do naszego codziennego życia, ale też i działalności badawczej istotne zmiany, głównie w postaci pracy zdalnej. Wykorzystanie oprogramowania ESRI ArcGIS w trakcie planowania oraz opracowywania wyników pomiarów składu chemicznego minerałów w mikroobszarze było podyktowane konkretnym problemem organizacyjno-technicznym, na który należało znaleźć rozwiązanie w stosunkowo krótkim czasie.

Wykorzystanie programów GIS w badaniach petrologicznych jest podejściem zdecydowanie przyspieszającym proces badawczy, ale to czas zweryfikuje, czy znajdzie ono szersze zastosowanie, czy też będzie ścieżką, która po jakimś czasie wygaśnie. Nie wiadomo również, w którą stronę będzie dalej rozwijało się oprogramowanie GIS i jaki będzie w tym udział sztucznej inteligencji. Ustalenie sposobu wybierania punktów reperowych, które stanowią ramy układu odniesienia w trakcie nawigacji w obrębie preparatu mikroskopowego, dzięki swojej prostocie, może okazać się bardzo przydatnym rozwiązaniem.

W cyfrowym załączniku (zał. 1) zamieszczono instrukcję nadawania współrzędnych punktom reperowym. Do korekcji języka angielskiego wykorzystano narzędzia SI: Google Translator i DeepL.

Autorki serdecznie dziękują dwóm anonimowym Recenzentom, których uwagi znacznie wpłynęły na poprawę oryginalnego tekstu, oraz wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania niniejszego artykułu. Badania chemiczne były finansowane z NCN Miniatura 4 nr 2020/04/X/ST10/00542.

LITERATURA

ASMUSSEN P., CONRAD O., GÜNTHER A., KIRSCH M., RILLER U. 2015 – Semi-automatic segmentation of petrographic thin section images using a "seeded-region growing algorithm" with an application to characterize wheathered subarkose sandstone. Computers & Geosciences, 83: 89–99.

BARTUŚ T., MASTEJ W., ŁODZIŃSKI M., BARAMUTA J. 2019 – Geostrada Sudecka. Przewodnik geologiczny, tom I. Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków.

BERREZUETA E., DOMÍNGUEZ-CUESTA M.J. 2016 – Quantification of sandstone pore system by optical image analysis through high-resolution scanner images. Geo-Temas, 16 (2): 447–450.

GARD M., HASTEROK D., HALPIN J.A. 2019 – Global whole-rock geochemical database compilation. Earth System Science Data, 11: 1553–1566.

https://georoc.eu/georoc/new-start.asp

https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.htm

https://www.arivis.com/products/cloud-ai

https://www.usgs.gov/faqs/what-does-georeferenced-mean

KÖRBER N. 2023 – MIA is an open-source standalone deep learning application for microscopic image analysis. Cell Reports Methods, 3 (7): 100517.

LI Y., ONASCH C.M., GUO Y. 2008 – GIS-based detection of grain boundaries. Journal of Structural Geology, 30 (4): 431–443.

MATUSIAK-MAŁEK M., PUZIEWICZ J., NTAFLOS T., GRÉGOIRE M., BENOIT M., KLÜGEL A. 2014 – Two contrasting lithologies in off-rift subcontinental lithospheric mantle beneath Central Europe–the Krzeniów (SW Poland) case study. Journal of Petrology, 55 (9): 1799–1828.

MATUSIAK-MAŁEK M., PUZIEWICZ J., NTAFLOS T., GRÉGOIRE M., KUKUŁA A., WOJTULEK P.M. 2017 – Origin and evolution of rare amphibole-bearing mantle peridotites from Wilcza Góra (SW Poland), Central Europe. Lithos, 286: 302–323.

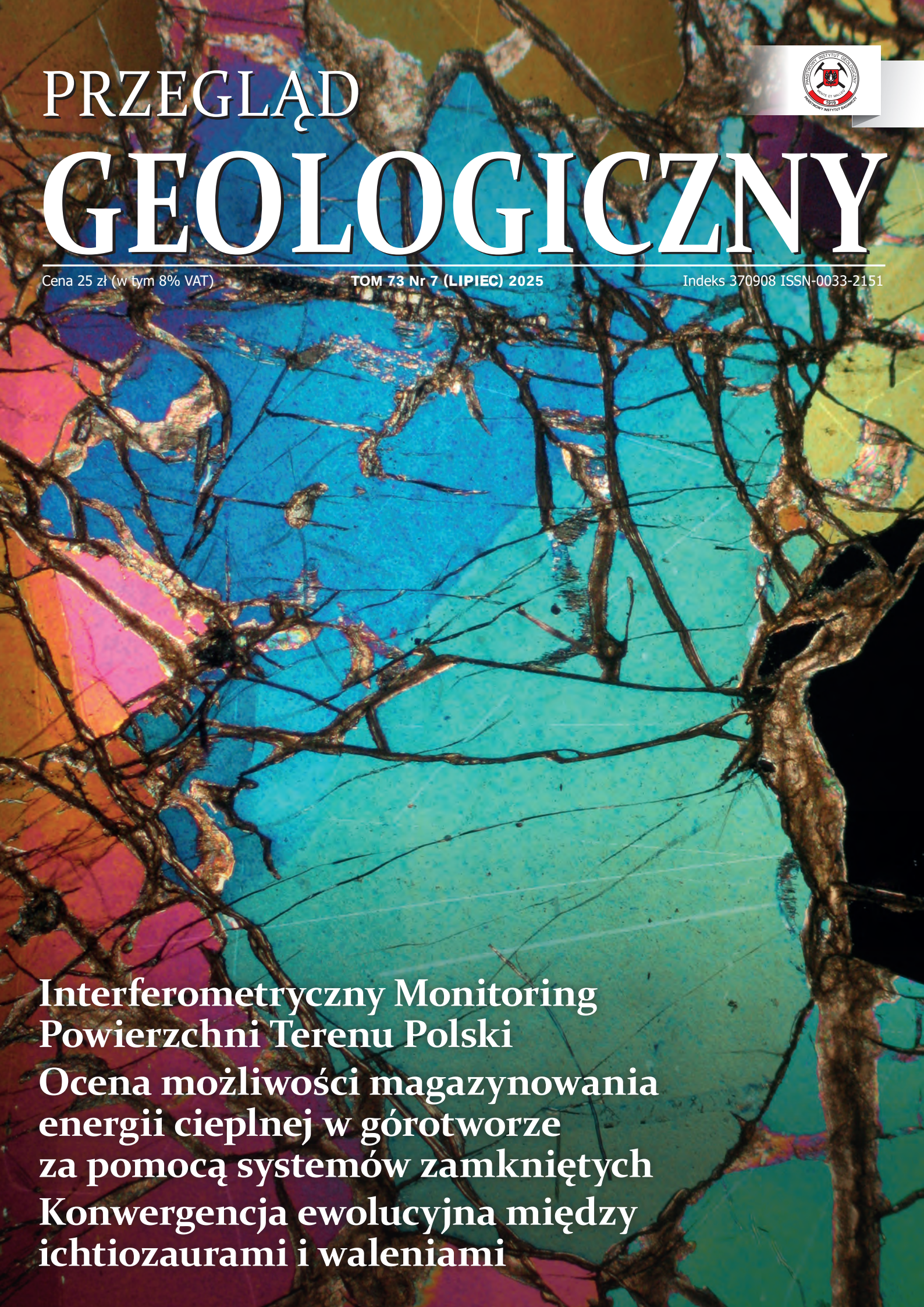
MATUSIAK-MAŁEK M., PUZIEWICZ J., NTAFLOS T., WOODLAND A., UENVER-THIELE L., BÜCHNER J., GRÉGOIRE M., AULBACH S. 2021 – Variable origin of clinopyroxene megacrysts carried by Cenozoic volcanic rocks from the eastern limb of Central Europe-

an Volcanic Province (SE Germany and SW Poland). Lithos, 382–383, 105936.
NASERI A., NASAB A.R. 2023 – Automatic identification of minerals in thin sections using image processing. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 14: 3369–3381.
NOWAK M., MUSZYŃSKI A. 2020 – Dokumentacja znalezisk meteorytu Morasko w latach 2011–2014 – problemy metodyczne i uzyskane efekty. Przegląd Geologiczny, 68 (12): 879–885.
NOWAK M., MUSZYŃSKI A., EWERTOWSKI M. 2011 – Praktyczne aspekty wykorzystania wybranych metod ustalania składu mineralnego w ksenolitach perydotytowych. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 444: 157–170.
NOWOSAD J., STEPINSKI T.F. 2022 – Extended SLIC superpixels algorithm for applications to non-imagery geospatial rasters. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 112, 102935.
PETRELLI M. 2024 – Machine learning in petrology: state-of-the-art and future perspectives. Journal of Petrology, 65: 1–29.
PIETEREK B., BROŽ P., HAUBER E., STEPHAN K. 2024 – Insight from the Noachian-aged fractured crust to the volcanic evolution of Mars: A case study from the Thaumasia graben and Claritas Fossae. Icarus, 407, 115770.
PUZIEWICZ J., MATUSIAK-MAŁEK M., NTAFLOS T., GRÉGOIRE M., KACZMAREK M.A., AULBACH S., ZIOBRO M., KUKUŁA A. 2020 – Three major types of subcontinental lithospheric mantle beneath the Variscan orogen in Europe. Lithos, 362–363, 105548.
TARQUINI S., FAVALLI M. 2010 – A microscopic information system (MIS) for petrographic analysis. Computers & Geosciences, 36 (5): 665–674.
USTINOV S., OSTAPCHUK A., SVECHEREVSKIY A., USACHEV A., GRIDIN G., GRIGOREVA A., NAFIGIN I. 2022 – Prospects of geoinformatics in analyzing spatial heterogeneities of microstructural properties of a tectonic fault. Applied Sciences, 12 (6), 2864.

Praca wpłynęła do redakcji 6.08.2024 r.
Akceptowano do druku 24.04.2025 r.

PRZEGLĄD GEOLOGICZNY

Cena 25 zł (w tym 8% VAT) TOM 73 Nr 7 (LIPIEC) 2025 Indeks 370908 ISSN-0033-2151



Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski

Ocena możliwości magazynowania energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych

Konwergencja ewolucyjna między ichtiozaurami i waleniami

Zdjęcie na okładce: Kryształ oliwinu w ksenolicie perydotytowym pochodzącym z odsłonięcia Wzgórze Wołek k. Nowego Kościoła, Dolny Śląsk. Światło spolaryzowane, polaryzator i analizator w pozycji skrzyżowanej, krótsza krawędź zdjęcia – 3,9 mm. Patrz art. na str. 640. Fot. M. Nowak

Cover photo: Olivine crystal in a peridotite xenolith from the Wołek Hill outcrop near Nowy Kościół, Lower Silesia. Polarized light, polarizer and analyzer in crossed positions, shorter edge of image – 3.9 mm. See article on p. 640. Photo by M. Nowak