

## SHRIMP wspiera szczegółową kartografię geologiczną w Sudetach

Zbigniew Cymerman<sup>1</sup>, Ewa Krzemińska<sup>2</sup>



Z. Cymerman



E. Krzemińska

**SHRIMP supports detailed geological cartography in the Sudetes.** *Prz. Geol.*, 72: 719–722; doi: 10.7306/2024.54

*Abstract.* For the first time, at the beginning of the 2<sup>nd</sup> edition of the Detailed Geological Map of the Sudetes 1 : 25,000, new, extended geochronological studies using the U-Pb method on zircons by means of the modern SHRIMP device were planned. They were completed by chemical dating of monazites with the WDS Cameca Sx100 electron microprobe. As a result of age studies about 920 new U-Pb zircon analyses were obtained from 28 samples of the several important rock-types of the Góry Sowie Metamorphic Complex, which significantly expands the scope of radiometric age record in this area. Apart from age, other diagnostic parameters were also used, such as Th/U ratios in zircon. They allow better understanding of the extremely complicated tectonometamorphic evolution of the Góry Sowie Metamorphic Complex during the complex orogenic processes in the Paleozoic in the NE part of the Bohemian Massif.

**Keywords:** geological map, migmatites, U-Pb zircon geochronology, age of protolith

W kwietniu 2019 r. rozpoczęto realizację II edycji *Szczegółowej Mapy Geologicznej Sudetów* (SMGS) w skali 1 : 25 000. To zadanie było i jest realizowane zgodnie z decyzjami ówczesnego Ministra Środowiska dla projektów robót geologicznych dla reambulacji SMGS 1 : 25 000 dla 13 arkuszy tej mapy (Zagórze Śląskie, Pieszyce, Ostroszowice, Walim, Jugów, Ludwikowice Kłodzkie, Nowa Ruda, Radków, Kudowa Zdrój, Jeleniów [i Pasterska Góra], Wambierzyce, Szalejów Górny i Polanica Zdrój). W projektach tych, po raz pierwszy na potrzeby SMGS 1 : 25 000, zaplanowano wykonanie dodatkowo na każdym arkuszu m.in. badań geofizycznych z zastosowaniem tomografii elektrooporowej (ERT) i sejsmicznej tomografii refrakcyjnej (SRT-P) oraz nowych badań radiometrycznych metodą U-Pb na cyrkonach na nowoczesnym urządzeniu SHRIMP, a także datawań chemicznych monacytów na mikrosondzie elektronowej WDS Cameca Sx100. Oba instrumenty znajdują się Laboratorium Analiz w Mikroobszarze (LAM) w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym (PIG-PIB) w Warszawie.

Z 13 nowo realizowanych arkuszy mapy SMGS 1 : 25 000 aż 7 obejmuje obszar metamorficznego kompleksu sowiogórskiego. Są to arkusze: Zagórze Śląskie, Walim, Pieszyce, Jugów, Ostroszowice, Ludwikowice Kłodzkie i Nowa Ruda. Kompleks sowiogórski jest zbudowany głównie ze zróżnicowanych teksturalnie i strukturalnie dewońskich migmatytów wywodzących się ze staropaleozoicznego protolitu o charakterze orto- i paragnejsów i bardzo zmiennym stopniu jego zachowania. W kompleksie sowiogórskim, ale w mniejszej ilości, występują jeszcze różnego typu amfibolity i skały ultramaficzne oraz granulity, a zupełnie podrzędnie skały żyłowe. Kiedy powstawała pierwsza polska edycja SMGS 1 : 25 000 (w latach 50. i 60. XX w.) panował powszechnie akceptowany pogląd o proterozoicznym, a nawet archaicznym wieku tego kompleksu metamorficznego (Oberc, 1968, 1977). Przygotowane pod koniec lat 90. ub.w. zestawienie dostępnych w tamtym momencie wyników geochronologicznych z obszaru Gór

Sowich zaprezentowane przez Cymermana (1998) poddało w wątpliwość te wcześniejsze hipotezy. W publikacjach z tego okresu zaczęły się stopniowo pojawiać wyniki datawań izotopowych próbek ze skał metamorficznych kompleksu sowiogórskiego, wskazujące na wczesnoordowicki (ok. 484 mln lat) czy nawet na wczesnosylurski–landowerski (ok. 440 mln lat) wiek protolitu magmowego, a także wiek modelowy nie starszy niż 1,54 mld lat (Kröner, Hegner, 1998). Były to w większości wyniki analiz U-Pb wykonane techniką klasyczną (ewaporacyjną). Z uwagi na metodykę odparowywania całego ziarna w tej metodzie, weryfikacja niektórych wyników wydawała się wskazana. Mikroanalityczna technika, jaką jest spektrometria mas jonów wtórnych (SIMS) z wykorzystaniem np. mikrosondy jonowej SHRIMP, daje bardziej szczegółowy wgląd w złożone etapy ewolucji ziarna i skały.

Ma to istotne znaczenie przy badaniach zmetamorfizowanych skał klastycznych kompleksu sowiogórskiego. Wiedza na temat wieku detrytusu jest podstawą do rozważań dotyczących heterogenicznych populacji wiekowych starszego materiału. Wyniki wcześniejszych badań (van Breemen i in., 1988; Oliver i in., 1993; O'Brien i in., 1997; Kröner, Hegner, 1998; Kryza, Fanning, 2007; Tabaud i in., 2021) pozwoliły ustalić, że statystycznie najczęściej starszy materiał był zdominowany (>50%) przez populację o wieku od ediakaru do kambru (ok. 600–493 mln lat), z mniej liczną grupą (20–35%) materiału paleoproterozoicznego (ok. 2,1–1,9 mld lat) i tylko z pojedynczo spotykanymi cyrkonami z neoarchaiku (ok. 2,7–2,4 mld lat).

Wszystkie dotychczasowe oznaczenia (Pb-Pb, U-Pb) wieku cyrkonów pochodzących z różnych lokalizacji (van Breemen i in., 1988) z kompleksu sowiogórskiego wskazywały na wczesnoordowicki magmatyzm protolitu granitowego (prawdopodobnie łuku magmowego) oraz na wczesnodewoński metamorfizm regionalny w warunkach facji granulitowej. Z kolei inne dane izotopowe (Rb-Sr i U-Pb) sugerowały, że skały tego kompleksu przeszły

<sup>1</sup> Emerytowany pracownik Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego. ORCID ID: 0000-0002-6056-0830.

<sup>2</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; [ekrz@pgi.gov.pl](mailto:ekrz@pgi.gov.pl); ORCID ID: 0000-0002-6832-8104.

także przez tektonometamorfiniczny epizod późnoweński (van Breemen i in., 1988).

W ramach rozpoczętej II edycji SMGS 1 : 25 000 przeprowadzono nowe badania izotopowe wieku wyselekcjonowanych 28 próbek skalnych z metamorfinicznego kompleksu sowiogórskiego, m.in.: 5 próbek migmatytu stromatytowego (metateksytu), 5 próbek migmatytu nebulitowego (diateksytu), 3 próbki leukognejsów zmylonityzowanych, 2 próbki pegmatytu. Oznaczenia te wykonano na cyrkonach na mikrosondzie jonowej SHRIMP w PIG-PIB. Stanowiły one nawiązanie do badania wieku cyrkonów z obszaru sowiogórskiego, które były wcześniej realizowane na bardzo podobnym instrumencie (Kryza, Fanning, 2007), jakim jest mikrosonda jonowa SHRIMP RG (o odwróconej geometrii) na Uniwersytecie Australijskim (*Australian National University Research School of Earth Sciences*). Warto podkreślić, że wykonane wówczas analizy cyrkonów z felzytowego granulitu z Zagórza i migmatytu (diateksytu) z okolic wsi Potoczek obejmowały dość ograniczoną liczbę pomiarów w każdej z dwóch próbek, odpowiednio 24 i 19 pkt. Niewątpliwie dostarczyły jednak dowodów na istnienie „starszych” granulitów wysokociśnieniowych w tej części warystytów środkowoeuropejskich o wieku ok. 395–400 mln lat, które następnie ok. 380 mln lat temu uległy dekompresji.

W odniesieniu do gnejsów, migmatytów i granitów anatektycznych wyniki z wcześniejszych publikacji (Kröner, Wegner, 1998; Kryza, Fanning, 2007) nie były zgodne. Z uwagi na odrębną technikę analityczną (ewaporacyjna vs SHRIMP) ich konfrontacja była nieoczywista. Wiek  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ok. 483–487 mln lat został zinterpretowany (Kröner, Wegner, 1998) jako czas krystalizacji magmowego protolitu, zaś wynik najmłodszy  $439,8 \pm 1,8$  mln lat został wskazany jako czas metamorfizmu. Analizy na mikrosondzie jonowej SHRIMP RG (Kryza, Fanning, 2007) udokumentowały inne daty, takie jak wiek protolitu –  $497 \pm 5$  mln lat, oraz dość rozproszoną grupę wyników, pomiędzy 480 a 518 mln lat. Pojedyncza analiza z młodszym wiekiem ok. 395 mln lat (stosunkiem  $\text{Th}/\text{U} = 0,05$ ) wg wspomnianych autorów mogła odpowiadać wzrostowi cyrkonu w warunkach metamorfizmu regionalnego.

W przypadku tak złożonych próbek skalnych jak ekstremalnie heterogeniczne migmatyty, przy małej statystycznej liczbie pomiarów, materiał dziedziczony może pozostać niedoszacowany lub nieudokumentowany, dlatego też w trakcie prac nad II edycją SMGS 1 : 25 000, w części chronostratygraficznej realizowanej w PIG-PIB, liczba analiz U-Pb na cyrkonach była z reguły dopasowana do typu skały czy złożoności problemu jaki należało rozwiązać. W litologicznych typach skał charakteryzujących się naturalnym ubóstwem cyrkonów, jak amfibolity czy gabra, liczba analiz przekraczała 30 pomiarów, w pegmatycie wynosiła 27. Dla odmiany w najbardziej heterogenicznym typie próbek jak migmatyty z uwagi na powszechnie występujące starsze populacje wiekowe liczba analiz utrzymywała się na poziomie od 45 do powyżej 50 punktów. W konsekwencji z 28 próbek różnych skał metamorfinicznego kompleksu sowiogórskiego uzyskano 920 nowych analiz cyrkonów, co znacząco rozszerza zakres udokumentowania wieku radiometrycznego na tym obszarze.

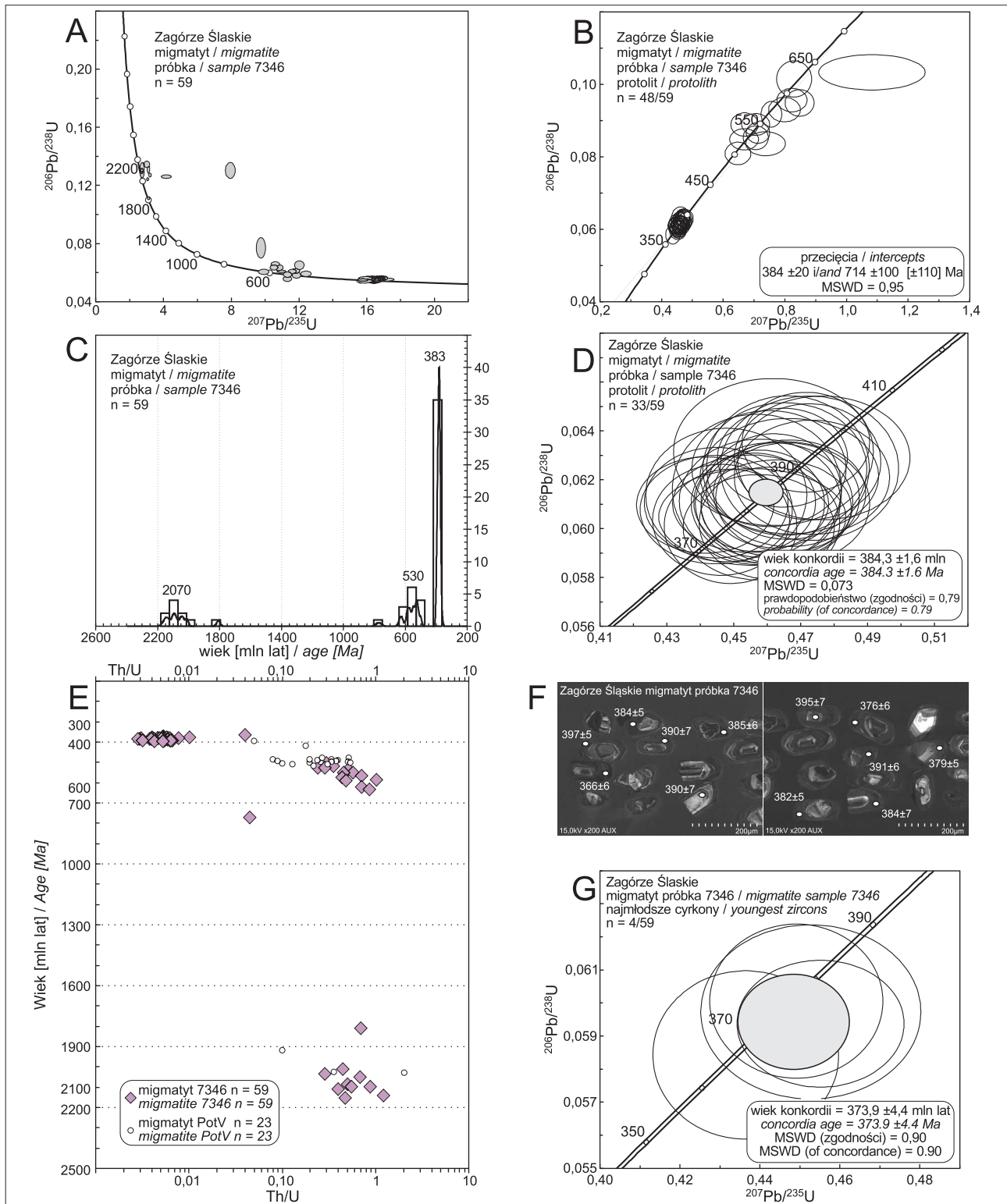
Nowe dane niewątpliwie potwierdziły część wcześniej zrealizowanych oznaczeń cyrkonów z tych skał (Kröner, Wegner, 1998; Kryza, Fanning, 2007). Wśród migmatytów sowiogórskich dominuje zdecydowanie starsza populacja cyrkonów dziedziczonych z pogranicza wczesnego ordo-wiku i (późnego kambru) furongu (ok. 472–501 mln lat). W młodziej populacji cyrkonów dziedziczonych przewa-

żają cyrkon o wieku izotopowym ok. 374–376 mln lat (późny dewon).

Dobrym przykładem uzupełnień i weryfikacji wykonanych w toku prac nad II edycją SMGS 1 : 25 000 może być typowy migmatyt stromatytowy z arkusza Zagórza Śląskie. W próbce oznaczonej jako 7346 wykonano  $n = 59$  analiz cyrkonów. Uzyskane wyniki w większości o dobrej zgodności dat (ryc. 1A) (U-Pb versus Pb-Pb) obejmowały zakres wieku od  $2011 \pm 11$  mln lat (+1% disc.) do  $366 \pm 6$  mln lat (+3%), koncentrując się w trzech grupach (ryc. 1C): dominującej, dość jednolitej dewońskiej z pikiem ok. 383 mln lat, nieco rozproszonej (ryc. 1B) wczesnokambryjskiej z pikiem ok. 530 mln lat oraz paleoproterozoicznej na pograniczu stateru i orosiru z pikiem ok. 2070 mln lat. Cyrkon (jądra) ze starszych dwóch grup z wynikami pomiędzy  $501,3 \pm 8$  mln a  $634 \pm 12$  mln lat (13/59) oraz od  $2010 \pm 10$  mln do  $2142 \pm 15$  mln (11/59) mają cechy krystalizacji magmowej, na co dodatkowo wskazuje współczynnik  $\text{Th}/\text{U}$  od 0,3 do 1,2 (ryc. 1E). Zgodnie z publikowanymi interpretacjami dla migmatytów z tego rejonu (Kryza, Fanning, 2007) odpowiadają one wiekowi ediakarskich skał magmowych i (paleo)proterozoicznych granitoidów, które dostarczyły detrytus w formie przerobionego już materiału klastycznego. Nowe badania ogólnie potwierdziły ten aspekt, ale dzięki wyższej statystyce analiz zarejestrowano dopływ ediakarskiego materiału klastycznego o szerszym zakresie wiekowym (w zakresie ok. 501–634 mln lat), podważając opinię, że w gnejsach i migmatytach sowiogórskich istniała luka wiekowa w dostawie materiału klastycznego pomiędzy 500 mln lat a 1100 mln lat temu (Kryza, Fanning, 2007).

Dzięki wspierającym pracom radiometrycznych nad II edycją SMGS 1 : 25 000 znaczenia nabrała nowa interpretacja dominującej grupy cyrkonów (35/59) o jednolitym wieku konkordii  $384,3 \pm 1,6$  mln lat (ryc. 1D), których parametr  $\text{Th}/\text{U} < 0,1$  wskazuje jednolicie na krystalizację w warunkach metamorfizmu regionalnego. Dyskryminator  $\text{Th}/\text{U} < 0,1$  bywa powszechnie używany (Rubato, 2002) do odróżniania cyrkonów krystalizujących ze stopu magmowego od tych powstałych z fluidów metamorfinicznych. Jego stosowanie wymaga jednak zastrzeżenia w postaci informacji na temat systemu zamkniętego, z jednej strony oraz obecności monacytu w skale (Yakymchuk i in., 2018). Niewątpliwie za obserwowane niskie stosunki  $\text{Th}/\text{U}$  w cyrkonach z omawianego migmatytu z Zagórza Śląskiego (próbka 7346) (ryc. 1E) odpowiadają monocyty powszechnie obecne w tej skale.

Przeprowadzone ostatnio modelowanie różnych systemów metamorfinicznych (Yakymchuk i in., 2018) ujawniło, że głównymi czynnikami kontrolującymi stosunek  $\text{Th}/\text{U}$  cyrkonu metamorfinicznego są stężenia  $\text{Th}$  i  $\text{U}$  w skale oraz rozpad czy wzrost monacytu w równowadze z cyrkonem. Ważną rolę w kształtowaniu stosunku  $\text{Th}/\text{U}$  cyrkonu odgrywa też względny czas wzrostu cyrkonu i monacytu podczas chłodzenia i krystalizacji. Cyrkon krystalizujące wcześniej w pobliżu pikę metamorfizmu z reguły mają podwyższone stosunki  $\text{Th}/\text{U}$ , podczas gdy ziarna, które wyrosły w pobliżu stanu solidusu, mają niskie stosunki  $\text{Th}/\text{U}$ , co odzwierciedla równoczesny wzrost monacytu podczas chłodzenia i krystalizacji. Dla porównania w migmatycie PotVb (okolic wsi Potoczek), na podstawie publikowanych wcześniej danych (Kryza, Fanning, 2007), parametr  $\text{Th}/\text{U}$  (ryc. 1E) w większości przypadków jest wyższy od 0,1, co sugeruje odmienną historię ewolucji tego migmatytu, a konkretnie zapis metamorfizmu relatywnie wyższej temperatury, co jest zgodne opisanymi tam cecha-



**Ryc. 1.** Podsumowanie wyników analiz geochronologicznych próbki migmatytu stromatytowego (próbka nr 7346) z arkusza Zagórze Śląskie: **A** – diagram konkordii z wynikami wszystkich analiz cyrkonów n = 59; **B** – diagram konkordii dla dwóch dominujących grup cyrkonów; **C** – histogram prezentujący wiek i częstość głównych grup cyrkonów; **D** – diagram konkordii i wiek dominujących grup cyrkonów; **E** – zestawienie wieku i parametru Th/U (w skali logarytmicznej) w analizowanych cyrkonach z migmatytu 7346 oraz PotV (Kryza, Fanning, 2007); **F** – obrazy katodoluminescencyjne cyrkonów z lokalizacją miejsca analizy i wiekiem (jasność i kontrast zmodyfikowane – uśrednione); **G** – wiek konkordii dla najmłodszych obwódek w cyrkonach (n = 4)

**Fig. 1.** Summary of the results of geochronological analyses of stromatitic migmatite (sample No. 7346) from the Zagórze Śląskie sheet; **A** – concordia diagram with the results of all analyses of n = 59 zircons; **B** – concordia diagram of the two dominant zircon groups; **C** – histogram showing age and frequency of the main zircon groups; **D** – concordia diagram and age of dominant zircon groups; **E** – comparison of age and Th/U parameter (in logarithmic scale) in analysed zircons from migmatite 7346 and PotV (Kryza, Fanning, 2007); **F** – cathodoluminescence images of zircons with the analysis spot location and age (brightness and contrast modified and averaged); **G** – concordia age for the youngest rims in zircons (n = 4)



mi petrograficznymi (anatektyczne topienie diateksytu). Nie ma tam żadnych informacji o obecności monacytów.

W analizowanych próbkach z arkusza Zagórze Śląskie monocyty były powszechne. Jak pokazuje zaprezentowany tu przykład jednej z 28 datowanych próbek cyrkonów, nowe badania radiometryczne dostarczyły licznych informacji petrogenetycznych, które stawiają w nowym świetle kluczowe aspekty ewolucji migmatytów na obszarze sówiogórskiego kompleksu metamorficznego.

Warto podkreślić, że dla uzyskania całościowego obrazu kartowanych formacji skalnych podczas rozpoczętej II edycji SMGS 1 : 25 000 przeprowadzono także datowania chemiczne monacytów, wykorzystując do tego mikrosondę elektronową WDS Cameca Sx100. Takie komplementarne zastosowanie obu technik analitycznych wynika z odmiennego wpływu różnych warunków metamorfizmu na cyrkon i monocyty (Rubatto i in., 2006). Geochronologia monacytowa została niedawno skutecznie wykorzystana dla rozpoznania ewolucji gnejsów i granulitów Gór Sowich (Jastrzębski i in., 2021). W toku wykonywania prac przy nowej II edycji SMGS 1 : 25 000 otrzymano kilkakrotnie nowych oznaczeń monacytów, w tym na obszarze arkusza Zagórze Śląskie 95 analiz z 6 próbek, które dobrze wpisują się w opublikowane wcześniej dane geochronologiczne. Potwierdzają one dominację populacji monacytów środkowo- i górnodewońskich (ok. 382–388 mln lat). W starszej populacji cyrkonów odziedziczonych pojawiają się także nieliczne monocyty o wieku dolnodewońskim i sylurskim oraz furońskie (późnokambryjskie), a także monocyty późnoordowickie. Generalnie otrzymane wyniki pozwalają, razem z wykonanymi oznaczeniami radiometrycznymi metodą U-Pb na cyrkonach, znacznie lepiej zrozumieć skomplikowaną ewolucję tektonometamorfinę kompleksu sówiogórskiego podczas złożonych procesów orogenicznych w paleozoiku w NE części Masywu Czeskiego. Dane z nowych oznaczeń radiometrycznych wykonanych metodą U-Pb na cyrkonach przedstawiono w formie tabelarycznej w objaśnieniach do każdego z arkuszy SMGS 1 : 25 000. Należy podkreślić, że część z otrzymanych wyników radiometrycznych jest trudna do jednoznacznej interpretacji. Między innymi w granitognejsie (protomylonicie) z arkusza Nowa Ruda SMGS 1 : 25 000 stwierdzono główną populację cyrkonów o wieku środkowego pensylwanu (późny karbon) oraz permski wiek młodszej populacji cyrkonów magmowych. Z kolei wiek protolitu dwóch gabr, oparty o wiek populacji cyrkonów magmowych, z dwóch różnych lokalizacji na arkuszu Ostroszowice SMGS 1 : 25 000 jest odmienny: sylurski (landowerski) vs ordowicki/furoński. Podobnego wieku jest także pobliski amfibolit zlokalizowany na arkuszu Ostroszowice. Trzy analizowane próbki pegmatytów, każda z innego arkusza mapy SMGS 1 : 25 000, mają różny wiek protolitu magmowego (środkowodewoński, sylurski lub złożony). Towarzyszy im młodsza populacja cyrkonów magmowych z wczesnego dewonu lub dwukrotnie wżenu.

W nowych pracach kartograficznych na obszarze tak intensywnie zmigmatyzowanego kompleksu sówiogórskiego dążono do wydzielenia metateksytów i diateksytów (*sensu* Brown, 1973). Metateksyty charakteryzują się zachowaną jeszcze strukturą paleosomu i teksturami metamorficznymi, natomiast diateksyty wykazują znaczne modyfikacje teksturalne i zniszczenie struktur paleosomu oraz intensywny rozwój struktur z płynięcia. Niestety zbyt mała

liczba próbek, na których wykonano systematyczne oznaczenia radiometryczne metodą U-Pb na cyrkonach, nie pozwalała na kartograficzne zróżnicowanie metateksytów od diateksytów ze względu na złożone, długotrwałe, progresywne procesy tektonometamorfinę kompleksu sówiogórskiego.

Uzyskane wyniki analiz izotopowych U-Pb na cyrkonach i chemicznych *in situ* na monacytach w szlifach ze skał metamorficznych z silnie heterogenicznego kompleksu sówiogórskiego, pokazują, że taka komplementarna geochronologia jest nieodzownym uzupełnieniem i nowym narzędziem badawczym przy realizacji prac kartograficznych. Jest też dobrym punktem odniesienia do innych prac badawczo-analitycznych realizowanych na obszarze Sudeatów i niezbędnych korelacji litostratygraficznych.

Autorzy bardzo uprzejmie dziękują recenzentowi prof. Stanisławowi Mazurowi (ING PAN, Kraków) za weryfikację tekstu. Wyniki opisane w tekście i zaprezentowane na rycinie 1 zostały opracowane w ramach projektu nr 22.1509.2001.00.1.

## LITERATURA

- BROWN M. 1973 – The definition of metatexis, diatexis and migmatite. *Proc. Geol. Associat.*, 84: 371–382.
- CYMERMAN Z. 1998 – The Góry Sowie Terrane: a key to understanding the Palaeozoic evolution of the Sudetes area and beyond. *Geol. Quart.*, 42 (4): 379–400.
- JASTRZĘBSKI M., BUDZYŃ B., ŻELAŻNIEWICZ A., KONEČNÝ P., SLÁMA J., KOZUB-BUDZYŃ G., SKRZYPEK E., JAŻWA A. 2021 – Eo-Variscan metamorphism in the Bohemian Massif: Thermodynamic modelling and monazite geochronology of gneisses and granulites of the Góry Sowie Massif, SW Poland. *J. Metamorph. Geol.*, 39: 751–779.
- KRÖNER A., HEGNER E. 1998 – Geochemistry, single zircon ages and Sm-Nd systematics of granitoid rocks from the Góry Sowie (Owl Mts), Polish West Sudetes: evidence for early Palaeozoic arc-related plutonism. *J. Geol. Soc.*, 155: 711–724.
- KRYZA R., FANNING C.M. 2007 – Devonian deep-crustal processes and uplift in the Variscan Orogen: evidence from SHRIMP zircon ages from the HT-HP granulites and migmatites of the Góry Sowie (Polish Sudetes). *Geodinam. Acta*, 20: 159–175; <https://doi.org/10.3166/ga.20.159-175>
- OBERC J. 1968 – Prekamb. Sudety. [W:] Budowa Geologiczna Polski, tom 1. Stratygrafia, część 1: 63–102.
- OBERC J. 1977 – The Pre-Assyntian and Assyntian (Baikalian) elements in South-Western Poland. [W:] *Geology of Poland, IV. Tectonics*: 99–173.
- O'BRIEN P.J., KRÖNER A., JAECKEL P., HEGNER E., ŻELAŻNIEWICZ A., KRYZA R. 1997 – Petrological and isotopic studies on Palaeozoic high pressure granulites with a medium pressure overprint, Góry Sowie (Owl) Mts., Polish Sudetes. *J. Petrolog.*, 38: 433–456.
- OLIVER G.J.H., CORFU F., KROGH T.E. 1993 – U-Pb ages from SW Poland: evidence for a Caledonian suture zone between Baltica and Gondwana. *J. Geol. Soc., London*, 150: 355–369.
- RUBATTO D. 2002 – Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chem. Geol.*, 184: 123–138.
- RUBATTO D., HERMANN J., BUICK I.S. 2006 – Temperature and Bulk Composition Control on the Growth of Monazite and Zircon During Low-pressure Anatexis (Mount Stafford, Central Australia). *J. Petrol.*, 47: 1976–1996; <https://doi.org/10.1093/ptrology/egl033>
- TABAUD A.S., ŠTÍPSKÁ P., MAZUR S., SCHULMANN K., MÍKOVÁ J., WONG J., SUN M. 2021 – Evolution of a Cambro-Ordovician active margin in northern Gondwana: Geochemical and zircon geochronological evidence from the Góry Sowie metasedimentary rocks, Poland. *Gondwana Res.*, 90: 1–26; <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.10.011>
- VAN BREEMEN O., BOWES D.R., AFTALION M., ŻELAŻNIEWICZ A. 1988 – Devonian tectonothermal activity in the Góry Sowie gneissic block, Sudetes, southwestern Poland: evidence from Rb-Sr and U-Pb isotopic studies. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 58: 3–19.
- YAKYMCHUK C., KIRKLAND C.L., CLARK C. 2018 – Th/U in metamorphic zircons. *J. Metamorph. Geol.*, 36: 715–737.

Praca wpłynęła do redakcji 26.11.2024 r.  
Akceptowano do druku 11.12.2024 r.