

Skład izotopowy (U-Pb, O) cyrkonów z waryscyjskich skał magmowych w strefie uskokowej Kraków–Lubliniec i obszarach przyległych w badaniach mikrosondą jonową SHRIMP IIe/MC

Stanisław Z. Mikulski¹, Ewa Krzemińska¹, Zbigniew J. Czupyt¹



S.Z. Mikulski



E. Krzemińska



Z.J. Czupyt

Isotopic composition (U-Pb, O) of zircons from Variscan igneous rocks in the Kraków–Lubliniec zone and adjacent areas in SHRIMP IIe/MC ion microprobe studies. *Prz. Geol.*, 72: 735–739; doi: 10.7306/2024.57

A b s t r a c t. In situ analyses of zircon oxygen isotope compositions integrated with U–Pb dating have been used as a tracer of igneous processes on the Małopolska and Upper Silesia Blocks in the Kraków–Lubliniec Fault Zone (KLFZ). This integration provides one of the most robust records of primary magmatic oxygen isotope ratios, making them an important archive for crustal evolution considerations. The sensitive SHRIMP IIe/MC high-resolution microprobe was used to distinguish differences in melt components related to the Carboniferous–Permian magmatism and Mo–Cu (W) mineralization.

The compilation of zircon oxygen isotope ratios from several samples from the KLFZ reveals variable magmatic $\delta^{18}\text{O}$ values, interpreted as mixing of the mantle ($\delta^{18}\text{O} \sim 5.3 \pm 0.6\%$) and crustal melts ($\delta^{18}\text{O} > 6\%$), with no contamination by sediments (i.e. $\delta^{18}\text{O} > 10\%$). There is also a systematic record of the influence of hydrothermal processes with $\delta^{18}\text{O}$ values $< 4\%$. These results can be potentially used as a database, presented as a map of characteristic $\delta^{18}\text{O}$ values collected as part of the tasks of the Polish Geological Survey. The starting point for this database could be a collection of about 600 oxygen isotope analyses of zircons from 20 samples of previously dated zircons from the MB in the KLFZ, accompanied by about 260 oxygen isotope analyses from 14 samples from Variscan rocks of the Sudetic area (southern Poland).

Keywords: Oxygen isotopes, U-Pb geochronology, igneous rocks, Kraków-Lubliniec Fault Zone, Poland

Skład izotopowy skał plutonicznych i wulkanicznych może dostarczać informacji na temat magmowej i tektonicznej ewolucji regionów geologicznych. Źródłem tego typu danych od wielu lat są wyniki badań izotopowych skał i badań pojedynczych minerałów występujących w kompleksach skalnych w rejonach aktywnych magmowo. Szczególną rolę odgrywa tu cyrkon. Obok zmian składu izotopowego radiogenicznego ołowiu (Pb) i uranu (U), które rejestrują czas krystalizacji cyrkonu, także stabilne izotopy tlenu (O) w tym mineralie dostarczają informacji o właściwościach stopu magmowego w momencie krystalizacji cyrkonu. Szczegółowy zapis pochodzenia magmy i jej ewolucji pomaga w rozwiązywaniu kwestii dotyczących regionalnych czynników geologicznych (np. Smithies i in., 2021).

Stosunki izotopowe U-Pb oraz O (zapisywane jako $\delta^{18}\text{O}$) informują o źródle stopu i czasie jego krystalizacji, przez co nadają się do identyfikacji procesów magmowych, hydrotermalnych czy metamorficznych (Valley i in., 2005; Liebmann i in., 2023). Parametry te mogą być wykorzystywane także do innych badań geologicznych. Przykładem może być działanie podjęte przez służbę geologiczną stanu Zachodnia Australia (*Geological Survey of Western Australia* – GSWA), która w 2021 r., w ramach specjalnego programu (*Accelerated Geosciencer*), opublikowała pierwszą mapę obrazującą skład izotopowy tlenu w cyrkonach ze skał magmowych Zachodniej Australii (Lu i in., 2021).

Dane te rzucają dodatkowe światło na ewolucję skorupy kontynentalnej w tym regionie i jej zasoby mineralne. Pierwsze wydanie mapy opracowano na podstawie wyników 880 analiz 9 próbek cyrkonów z Australii Zachodniej. Zaktualizowana ostatnio mapa izotopów tlenu w cyrkonach tego największego stanu Australii, o powierzchni 2,5 mln km², bazuje już na 3909 analizach 231 próbek. Mapa ta jest udostępniana on-line za pomocą interaktywnego systemu mapowania (GeoVIEW.WA), umożliwiającą wyświetlenie i wyszukanie informacji łącznie z innymi mapami geologicznymi, a także zestawami danych, w tym geochronologicznymi, oraz pochodzących z eksploracji złóż surowców mineralnych. Te zestawy informacji podlegają bieżącym aktualizacjom w miarę generowania nowych danych.

W Polsce badania izotopów tlenu w cyrkonach są coraz częściej stosowane jako uzupełnienie badań geochronologicznych skał, w związku z tym wydaje się, że wkrótce można będzie opublikować raport o składzie izotopowym tych minerałów w wybranych rejonach naszego kraju, a potem systematycznie go uzupełniać. Jednym z obszarów, które należałoby monitorować pod tym względem, jest strefa uskokowa Kraków–Lubliniec (SUKL; ryc. 1). Genera szeroko rozpowszechnionego magmatyzmu, w wyniku którego powstały zarówno skały plutoniczne, jak i kompleksy wulkaniczne zlokalizowane wzdłuż SUKL, jest nierozdzielnie związana z intensywną geodynamiczną i termiczną ewolucją skorupy Ziemi (Słaby i in., 2010). Jest to zatem

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa; ewa.krzeminska@pgi.gov.pl; stanislaw.mikulski@pgi.gov.pl; zbigniew.czupyt@pgi.gov.pl; ORCID: S.Z. Mikulski – 0000-0002-9941-5630; E. Krzemińska – 0000-0002-6832-8104; Z.J. Czupyt – 0000-0002-3416-9475

odpowiednie miejsce do systematycznych i bardziej zaawansowanych badań izotopowych.

OBSZAR BADAŃ

Badania izotopowe tlenu w cyrkonach wykonano w aktywnej tektonicznie strefie SUKL (ryc. 1; Buła i in., 2002), która oddziela blok górnośląski (część złożonego terranu Brunovistulicum) od bloku małopolskiego (BM). Na przełomie karbonu i permu, ok. 310–290 mln lat temu, w rejonie tym, stanowiącym przedpole orogenu waryscyjskiego w środkowej Europie, intrudowały wapniowo-alkaliczne stopy magmowe (Nawrocki i in., 2007, 2008, 2010; Mikulski i in., 2019; Jarmołowicz-Szulc, 2020). W strefie SUKL oraz głównie na bloku małopolskim (BM) występuje system żył kwarcowych z porfirową mineralizacją Mo-Cu-W wraz z towarzyszącą jej mineralizacją hydrotermalną, objawiającą się takimi minerałami rudnymi, jak molibdenit, chalkopiryt, piryt i scheelit oraz rzadziej minerały telluru i bizmutu lub impregnacja złotem w żyłach kwarcowych (Markowiak i in., 1994; Piekarski, 1994, 1995; Mikulski i in., 2008, 2019, wraz z literaturą; Oszczepalski i in., 2010).

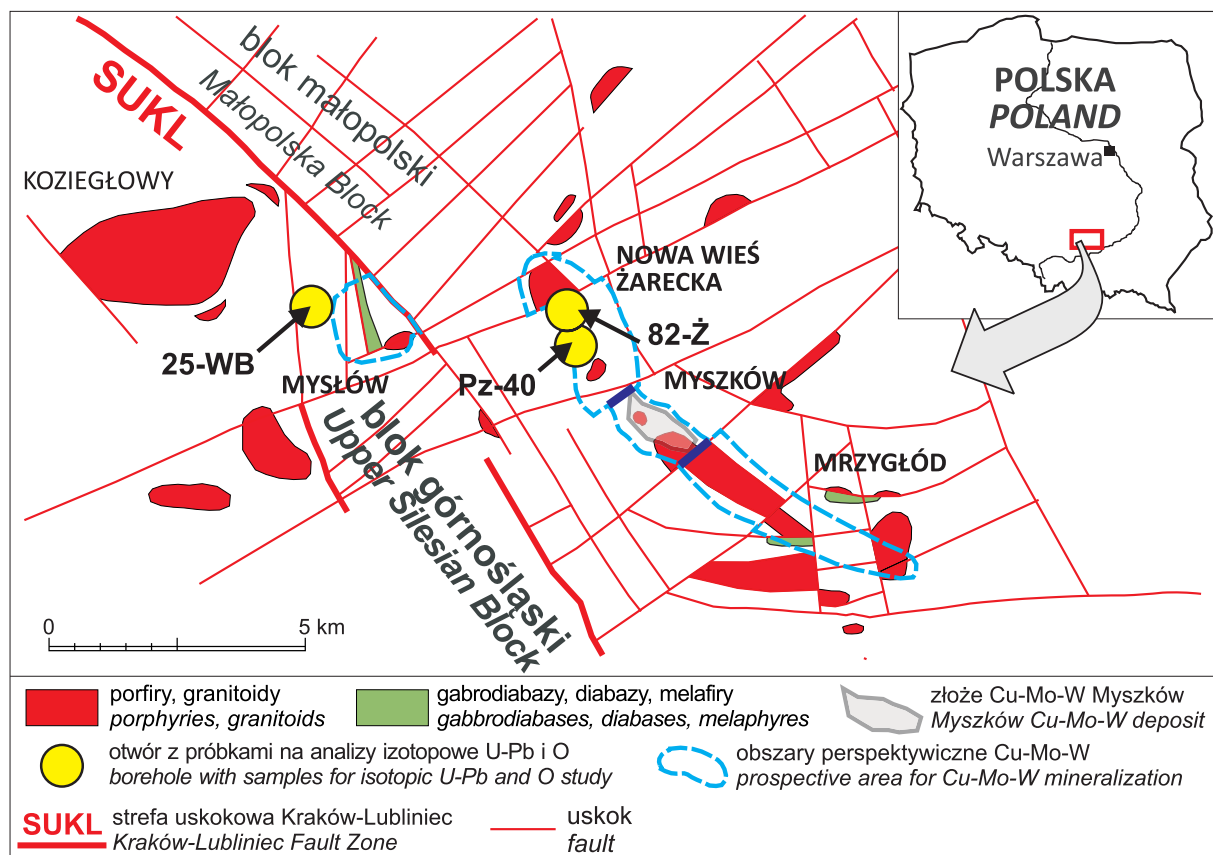
Wyniki badań geochronologicznych U-Pb euhedralnych do subhedralnych cyrkonów z wielu lokalizacji wzdłuż SUKL dowodzą, że magmatyzm występował w wąskim przedziale czasowym, ok. 10 mln lat, pomiędzy $303,8 \pm 2,2$ a $292,7 \pm 4,9$ mln lat temu (Mikulski i in., 2019). Można jednak wyróżnić dwa etapy, wcześniejszy ($303,8 \pm 2,2$ – $294,7 \pm 2,3$ mln lat temu), zdominowany

przez plutonizm felzytowy o składzie wapniowo-alkalicznym, oraz wulkanizm nieco późniejszy ($294,4 \pm 4,9$ – $292,7 \pm 4,9$ mln lat temu), o składzie maficznym do przejściowego. Aktywność magmowa w strefie SUKL była właściwie równoczesowa z postkolizyjnymi intruzjami granitowymi w europejskich waryscydach (Römer i in., 2001; Franke, 2006; Breitreutz i in., 2007; Sola i in., 2009).

ZAKRES BADAŃ

Po zakończeniu cyklu analiz U-Pb, który był systematycznie realizowany przez wiele lat (Mikulski i in., 2019), korzystając ze spektrometru mas jonów wtórnych (SIMS), skonfigurowanego do analizy izotopów stabilnych, za pomocą mikros sondy jonowej SHRIMP IIe/MC wykonano analizy izotopowe tlenu w datowanych cyrkonach. Czas pomiaru kluczowych mas izotopów tlenu, tj. proporcji $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, jest trzykrotnie krótszy niż analiz wieku. W zwykłym cyklu geochronologicznym pomiar musi obejmować do dziewięciu mas mierzonych jako $^{90}\text{Zr}_2\text{O}$, ^{204}Pb , 204.1 (tło), ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{238}U , $^{232}\text{Th}^{16}\text{O}$, $^{238}\text{U}^{16}\text{O}$.

Szczegółowe protokoły analiz izotopów tlenu przy użyciu mikros sondy jonowej SHRIMP IIe opublikowali Ickiarta (2008) i Kita i in. (2009). Kratery, jakie powstają w cyrkonach w wyniku tego badania (w procesie jonizacji i rozpylenia próbki) mają zazwyczaj średnicę 20–25 μm i są stosunkowo płytkie (głębokość 1 μm , gdy analiza trwa do 5 minut), co umożliwia wykorzystanie cyrkonów do kolejnych badań.



Ryc. 1. Lokalizacja archiwalnych wierzeń w strefie kontaktu bloku małopolskiego z blokiem górnośląskim na tle uproszczonej mapy geologicznej wg Buły (2002)

Fig. 1. Location of boreholes from the contact zone between the Małopolska Block and the Upper Silesia Block on the background of a simplified geological map according to Buła (2002)

WYNIKI

Pierwsze sesje pomiarowe izotopów tlenu w cyrkonach pochodzących ze skał magmowych BM, uprzednio datowane U-Pb, zrealizowano w 2015 r. Uzyskano statystycznie dużą liczbę wartości $\delta^{18}\text{O} < 7\%$ (Mikulski i in., 2016), podczas gdy w cyrkonach z granitów waryscyjskich i skał pokrewnych w Europie Zachodniej powszechnie notowano wartości $\delta^{18}\text{O} > 7\%$ (Scarrow i in., 2011; Pietranik i in., 2013).

Największą uwagę poświęcono juwenilnym cyrkonom pochodzącym ze skał magmowych bloku małopolskiego, które powstały 305–283 mln lat temu (wiek U-Pb). Wyniki $\delta^{18}\text{O}$ przedstawiono jako średnie ważone (arytmetyczne lub geometryczne) z błędem ± 2 odchylenia standardowe (SD), podobnie jak w bazie danych GSWA (Lu i in., 2021). Jednak przykładowe średnie wartości nie oddały we właściwy sposób specyfiki każdej badanej próbki i rozkładu wyników analiz izotopów tlenu w cyrkonach. Dość dobrze ilustruje to zestawienie czterech przykładowych wyników pomiarów izotopów tlenu w cyrkonach (ryc. 2) ze skał wulkanicznych i subwulkanicznych na bloku małopolskim, wykonanych mikrosondą jonową SHRIMP IIe/MC. Mimo różnic wieku U-Pb cyrkonów (od 305 do 283 mln lat) i odmiennej proveniencji (ryc. 1) mają one zbliżone wartości średnie $\delta^{18}\text{O}$: $5,75 \pm 0,16\%$; $6,30 \pm 0,18\%$; $5,975 \pm 0,12\%$ i $5,63 \pm 0,18\%$, co nie oznacza, że są identyczne. W każdej z tych próbek (ryc. 2) istnieje znaczna liczba cyrkonów pochodzących z krystalizacji stopu płaszczowego (szare pole na diagramach), o charakterystycznym, stałym zakresie wartości $\delta^{18}\text{O} \sim 5,3 \pm 0,6\%$ (Valley, 2003; Valley i in. 2005). Niewątpliwie wyniki izotopowe $\delta^{18}\text{O}$ pokazują rozkłady multimodalne, dobrze widoczne na histogramach krzywych gęstości prawdopodobieństwa (Liebmann i in., 2023), wyliczanych na podstawie arkusza kalkulacyjnego *Isoplot* (Ludwig, 2003). Dane ze strefy SUKL (ryc. 2) dostarczają ciekawych informacji i mogą być wykorzystane do szerszych interpretacji geologicznych. W każdej z czterech opisanych próbek wykonano od 18 do 31 analiz punktowych.

Dla porównania na mapie składu izotopowego tlenu w cyrkonach z Zachodniej Australii (Lu i in., 2021) liczba analiz próbki często ogranicza się do 17 punktów. Warto zwrócić uwagę na to, że większa liczba pomiarów zwiększa reprezentatywność wyników. Widoczny na diagramach rozkład wyników badań kilku próbek ze strefy SUKL (ryc. 2) może być zapisem mieszania się stopów płaszczowych $\delta^{18}\text{O} \sim 5,3 \pm 0,6\%$ i skorupowych $\delta^{18}\text{O} > 6\%$. Co ciekawe, nie odnotowano silnej kontaminacji materiałem osadowym (tzn. wartości $\delta^{18}\text{O} > 10\text{--}12\%$). Interesującym wynikiem jest systematyczny zapis wpływu procesów hydrotermalnych na skład izotopowy cyrkonów i pojawiające się wartości $\delta^{18}\text{O} < 4\%$.

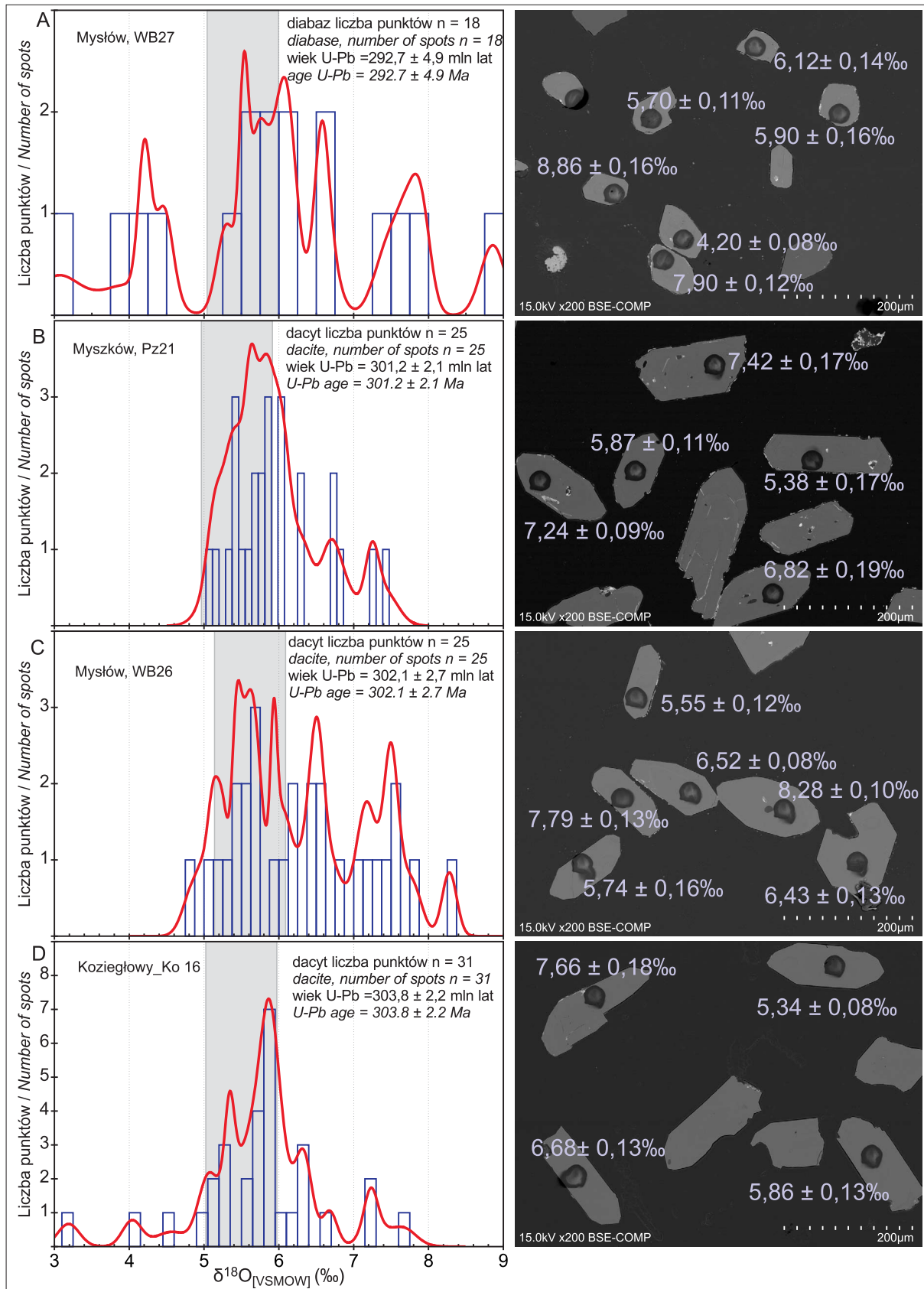
Mineralizacja Mo-Cu-W w rejonie BM i SUKL przestrzennie i genetycznie jest związana ze strefami przeobrażeń hydrotermalnych występujących w intruzjach porfirowych i ich otoczeniu. Relacje między okruszcowaniem, waryscyjskim magmatyzmem, intensywnością i typem przeobrażeń oraz wiek molibdenitu (303–295 mln lat; Mikulski, Stein, 2010), oznaczony metodą Re-Os, jednoznacznie wskazują na pomagmowe i hydrotermalne pochodzenie tej mineralizacji (Mikulski i in., 2019).

Do tej pory w cyrkonach pochodzących z 20 próbek z obszaru BM i SUKL wykonano 588 analiz izotopów tlenu (średnio 30 pkt. w próbce). Niektóre próbki cyrkonów z BM charakteryzowała obecność ziaren odziedziczonych, z dominującą populacją neoproterozoiczną o wieku 590–680 mln lat, i z niewielką ilością materiału mezoproterozoicznego ok. 1200–1300 mln lat (Mikulski, Krzemińska, 2017). Wyniki badań tego typu starszych ziaren interpretowano osobno. W celu porównania wyników badań wykonano także 258 analiz $\delta^{18}\text{O}$ 14 próbek datowanych cyrkonów z obszaru sudeckiego. Wartości $\delta^{18}\text{O}$ przeważnie były większe niż 7%.

PODSUMOWANIE

W toku badań izotopów tlenu $\delta^{18}\text{O}$ w cyrkonach, datowanych wcześniej U-Pb mikrosondą jonową SHRIMP IIe/MC, zgromadzono znaczącą statystycznie liczbę precyzyjnych wyników które poświadczają coraz częściej pojawiające się w publikacjach tezy, że istnieje związek pomiędzy wynikami analiz izotopowych U-Pb i O i jest on istotny w interpretacji czasu i typu epizodów magmowych. Na przykład wyniki badań tlenu w ziarnach cyrkonu ($n = 46$) pochodzących z ryolitów północno-wschodniego basenu niemieckiego wskazały, że skały te są efektem aktywności wulkanicznej na przełomie karbonu i permu (Pietranik i in., 2013). Podobnym badaniom poddano próbki ryolitu i granitu z Niżu Polskiego (Słodczyk i in., 2018). W tym samym czasie przedmiotem analiz izotopowych były cyrkon z waryscyjskich granitoidów Staré Město i Jawornik (wizen) oraz skał plutonicznych z rejonu Kłodzko–Złoty Stok (Jastrzębski i in., 2018) – wykonano 246 analiz 14 próbek. Obiektem badań były też cyrkon z ortognejsów bloku przedsudeckiego we wschodniej części terranu saksoturynskiego (Jastrzębski i in., 2023). Wymienione dane pozyskano za pomocą instrumentów SIMS o dużej geometrii, podwójnie ogniskujących, i analiz wykonanych z wykorzystaniem sond CAMECA IMS 1280HR oraz SHRIMP IIe/MC. Wszystkie wymienione wyniki badań mogą być wykorzystane do utworzenia bazy danych i mapy składu izotopowego tlenu w cyrkonach ze skał magmowych południowej Polski.

Wyniki badań cyrkonów pochodzących ze strefy uskołu Kraków–Lubliniec posłużyły do wyjaśnienia zagadnień związanych z mobilizacją i ewolucją magmy i świadczą o specyficznych cechach tej strefy. Pokazują bowiem, że magma intrudująca w strefie SUKL mogła pochodzić z dwóch źródeł, tj. płaszcz i skorupa. Te dwa źródła magmy wyraźnie odzwierciedla skład izotopowy skał (Słaby i in., 2010), wyrażony przez $\epsilon\text{Nd}(T)$, który w skałach wulkanicznych pośrednich zmienia się w zakresie od -1 do -2 , a w kwaśnych – od -4 do -5 . Analizy izotopowe tlenu w cyrkonach pokazują inny obraz udziału stopów płaszczowych i kontaminacji skorupowej (lub zjawiska magm hybrydowych), bardziej szczegółowy (w skali indywidualnej próbki). Analizy izotopowe tlenu w cyrkonach z pojedynczych próbek skał tego rejonu precyzyjniej wskazują udziały: stopów płaszczowych, kontaminacji skorupowej, a także magm hybrydowych. Zwiększająca się liczba dostępnych danych dotyczących parametrów izotopowych ma istotny potencjał w rozwiązywaniu problemów dotyczących ewolucji regionów aktywnych magmowo. Krysztaly cyrkonu, oprócz informacji o wieku skał, dostarczają jednego z najbardziej wiarygodnych zapisów parame-



Ryc. 2. Histogramy rozkładu wyników analiz izotopów tlenu w cyrkonach ze skał wulkanicznych i subwulkanicznych bloku małopolskiego i gornośląskiego (próbka Koziegłowy Ko 16) oraz mikroskopowe zdjęcia cyrkonów, dokumentujące lokalizację analizy SIMS i nieprawidłowości na ich powierzchniach, np. pęknięcia lub mikroszczeliny, wrostki, granice między żywicą epoksydową a ziarnem (obraz z elektronów wstecznie rozproszonych BSE)

Fig. 2. Histograms of the distribution of results of oxygen isotope analysis in zircons from volcanic and subvolcanic rocks of the Małopolska and Upper Silesia (sample Koziegłowy Ko 16) Blocks, and microscopic photos of zircons, documenting the location of the SIMS analysis and irregularities on their surfaces, e.g. cracks or micro-fissures, inclusions, and boundaries between epoxy resin and grain (image from backscattered electrons BSE)

trów izotopowych z magmowego i pomagmowego etapu ewolucji skorupy ziemskiej.

LITERATURA

- BREITKREUZ C., KENEDY A., GEISSLER M., EHLING B.C., KOPP J., MUSZYŃSKI A., PROTAS A., STOUGE S. 2007 – Far Eastern Avalonia: its chronostratigraphic structure revealed by SHRIMP zircon ages from Upper Carboniferous to Lower Permian volcanic rocks (drill cores from Germany, Poland and Denmark). *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 423: 173–190.
- BUŁA J. (red.) 2002 – Atlas geologiczny paleozoiku bez permu w strefie kontaktu bloków górnośląskiego i małopolskiego. Państw. Inst. Geol.
- FRANKE W. 2006 – The Variscan orogen in Central Europe: construction and collapse. [W:] Gee D.C., Stephenson R.A. (red.), *European lithosphere dynamics*. *Geol. Soc. Lond. Mem.*, 32, 333–343.
- ICKERT R.B., HIESS J., WILLIAMS I.S., HOLDEN P., IRELAND T.R., LANC P., SCHRA N., FOSTER J.J., CLEMENT S.W. 2008 – Determining high precision, in situ, oxygen isotope ratios with a SHRIMP II: Analyses of MPI-DING silicate-glass reference materials and zircon from contrasting granites. *Chem. Geol.*, 257: 114–128.
- JARMOŁOWICZ-SZULC K. 2020 – A reappraisal of K-Ar and new U-Pb age data for felsic rocks in the vicinity of the Kraków–Lubliniec Fault Zone (southern Poland). *Geol. Quart.*, 64 (3): 754–765.
- JASTRZĘBSKI M., MACHOWIAK K., KRZEMIŃSKA E., FARMER G.L., LARIONOV A.N., MURTEZI M., MAJKA J., SERGEEV S. 2018 – Geochronology, petrogenesis and geodynamic significance of the Viséan igneous rocks in the Central Sudetes, northeastern Bohemian Massif. *Lithos*, 316: 385–405.
- JASTRZĘBSKI M., ŻELAŻNIEWICZ A., STAWIKOWSKI W., BUZYŃ B., KRZEMIŃSKA E., MACHOWIAK K., MADEJS., BIAŁEK D., ŚLĄMA J., CZUPYT Z., JAŻWA A. 2023 – The eastern part of the Saxothuringian Terrane characterized by zircon and monazite data from the Doboszowice Metamorphic Complex in the Sudetes (SW Poland). *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 93: 229–249.
- KITA N.T., USHIKUBO T., FU B., VALLEY J.W. 2009 – High precision SIMS oxygen isotope analysis and the effect of sample topography. *Chem. Geol.*, 264: 43–57.
- LIEBMANN J., KIRKLAND C.L., CLIFF J.B., CHRISTOPHER J., SPENCER CH.J., CAVOSIE A.J. 2023 – Strategies towards robust interpretations of in situ zircon oxygen isotopes. *Geosci. Frontiers*, 14 (2023) 101523.
- LUDWIG K.R. 2003 – User's Manual for Isoplot 3.6 (February 2012 Revision). Berkeley Geochronology Center, Sp. Publication, 4.
- LU Y., WINGATE M.T.D., SMITHIES R.H., MARTIN L., JEON H., CHAMPION D.C., JOHNSON S.P., MOLE D.R. 2021 – Zircon oxygen isotope map of Western Australia: Geological Survey of Western Australia, digital data layer; <https://www.dmirns.wa.gov.au/geoview>.
- MARKOWIAK M., PIEKARSKI K., ŚLÓSZARZ J., HABRYN R., MARKIEWICZ J., TRUSZEL M., LASOŃ K., JURA D., BADERA J. 1994 – Wyniki badań geologicznych i złożowych paleozoicznego podłoża w obszarze Myszków–Mrzygłód. [W:] *Przewodnik 65. Zjazdu PTG w Sosnowcu*. *Pr. Nauk. UŚL.*, 1431: 173–217.
- MIKULSKI S.Z., KRZEMIŃSKA E., CZUPYT Z.J. 2016 – The $\delta^{18}\text{O}$ zircon isotope composition & U-Pb geochronology on SHRIMP IIe/MC – An example from the foreland of the Variscan orogenic belt (S Poland): 47–49; ugr.es/~shrimpworkshop/ewExternalFiles/Abstract_Book_Shrimp_Workshop_v1.pdf.
- MIKULSKI S.Z., KRZEMIŃSKA E. 2017 – Troublesome or diagnostic, inherited zircons in the course of U-Pb age studies of igneous rocks and porphyry mineralization from the Małopolska Block. Abstract VIII Polish Conference Petrological and mineralogical studies in geology, Kraków, *Mineralogia Special Papers* 46: 38.
- MIKULSKI S.Z., MARKOWIAK M., OSZCZEPALSKI S. 2008 – Gold in quartz-sulfide veinlets from db-4 drillhole (Będkowska Valley, southern Poland). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 429: 99–112.
- MIKULSKI S.Z., STEIN J.H. 2012 – Wiek molibdenitów w Polsce w świetle badań izotopowych Re-Os. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 452: 199–216.
- MIKULSKI S.Z., WILLIAMS I.S., MARKOWIAK M. 2019 – Carboniferous-Permian magmatism and Mo-Cu (W) mineralization in the contact zone between the Małopolska and Upper Silesia Blocks (south Poland): an echo of the Baltica-Gondwana collision. *Intern. J. Earth Sci.*, 108(5); doi: 10.1007/s00531-019-01715-9.
- NAWROCKI J., LEWANDOWSKA A., FANNING M. 2007 – Isotope and paleomagnetic ages of the Zalas rhyodacites (S Poland). *Prz. Geol.*, 55: 475–478.
- NAWROCKI J., FANNING M., LEWANDOWSKA A., POLECHOŃSKA O., WERNER T. 2008 – Palaeomagnetism and the age of the Cracow volcanic rocks (S Poland). *Intern. Geophys. J.*, 174: 475–488.
- NAWROCKI J., KRZEMIŃSKI L., PAŃCZYK M. 2010 – ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of selected rocks and minerals from the Kraków–Lubliniec Fault Zone, and their relation to the Paleozoic structural evolution of the Małopolska and Brunovistulian terranes (S Poland). *Geol. Quart.*, 54 (3): 289–300.
- OSZCZEPALSKI S., MARKOWIAK M., MIKULSKI S.Z., LASOŃ K., BUŁA Z., HABRYN R. 2010 – Porfirowa mineralizacja Mo-Cu-W w prekambryjsko-paleozoicznych utworach – analiza prognostyczna strefy kontaktu bloków górnośląskiego i małopolskiego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 429: 339–354.
- PIEKARSKI K. 1994 – Ocena wyników poszukiwań złóż rud polimetalicznych w utworach staropaleozoicznych obszaru Zawiercia. *Prz. Geol.*, 42 (8): 615–620.
- PIEKARSKI K. 1995 – Geologic setting and ore mineralization characteristics of the Myszków area (Poland). *Geol. Quart.*, 39 (1): 31–42.
- PIETRANIK A., ŚLÓDCZYK E., HAWKESWORTH C.J., BREITKREUZ C., STOREY C.D., WHITEHOUSE M., MILKE R. 2013 – Heterogeneous Zircon Cargo in Volcanic Late Paleozoic Rhyolites: Hf, O Isotope and Zr/Hf Records of Plutonic to Volcanic Magma Evolution. *J. Petrology*, 8: 1483–1501.
- RÖMER R.I., FÖRSTER H.J., BREITKREUZ C. 2001 – Intracontinental extensional magmatism with a subduction fingerprint: the late Carboniferous Halle Volcanic Complex (Germany). *Contrib. Mineral. Petrol.* 141: 201–221.
- SCARROW J.H., PEASEV, WHITEHOUSE M.J., MONTERO P., MOLINA J.F., MORENO J.A., CAMBESÉS A., BEA F. 2011 – Producing new crust whilst reworking old: high-precision SIMS zircon oxygen isotope evidence for contrasting styles of magma interaction in Variscan Central Iberian mafic-intermediate stocks. Abstract Seventh Hutton Symposium on Granites and related rocks, Avila, Spain, 4–9 July 2011, 136.
- ŚLABY E., BREITKREUZ C., ŻABA J., DOMAŃSKA-SIUDA J., GAJDIK K., FALENTY K., FALENTY A. 2010 – Magma generation in an alternating transtensional–transpressional regime, the Kraków–Lubliniec Fault Zone, Poland. *Lithos*, 119: 251–268.
- ŚLÓDCZYK E., PIETRANIK A., GLYNN S., WIEDENBECK M., BREITKREUZ CH., DHUIME B. 2018 – Contrasting sources of Late Paleozoic rhyolite magma in the Polish Lowlands: evidence from U-Pb ages and Hf and O isotope composition in zircon. *Int. J. Earth. Sci. Geol. Rundsch.*, 107: 2065–2081.
- SMITHIES R.H., LU Y., KIRKLAND C.L., JOHNSON T.E., MOLE D.R., CHAMPION D.C., MARTIN L., JEON H., WINGATE M.T.D., JOHNSON S.P. 2021 – Oxygen isotopes trace the origins of Earth's earliest continental crust. *Nature*, 592: 70–75.
- SOLA A.R., WILLIAMS I.S., NEIVA A.M.R., RIBEIRO M.L. 2009 – U-Th-Pb SHRIMP ages and oxygen isotope composition of zircon from two contrasting late Variscan granitoids, Nisa-Albuquerque batholith, SW Iberian Massif: Petrologic and regional implications. *Lithos*, 111: 156–167.
- VALLEY J.W. 2003 – Oxygen isotopes in zircon. *Rev. Mineral. Geochem.*, 53: 343–385.
- VALLEY J.W., LACKEY J.S., CAVOSIE A.J., CLECHENKO C.C., SPICUZZA M.J., BASEI M.A.S., BINDEMAN I.N., FERREIRA V.P., SIAL A.N., KING E.M., PECK W.H., SINHA A.K., WEI C.S. 2005 – 4.4 billion years of crustal maturation: Oxygen isotopes in magmatic zircon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 150: 561–580.

Praca wpłynęła do redakcji 15.11.2024 r.

Akceptowano do druku 10.12.2024 r.