

## CHIME — chemiczna metoda datowania minerałów

Monika A. Kusiak\*,\*\*



Chemiczną metodę datowania minerałów — CHIME (CHEMical Th-U-total Pb Isochron MEthod) zaproponowali na początku lat 90. XX w. Japończycy (Suzuki & Adachi, 1991). Wcześniej przy użyciu mikros sondy elektronowej (EMP) datowano uraninit —  $\text{UO}_2$ , huttonit —  $\text{ThSiO}_4$  oraz thoryt —  $\text{ThSiO}_4$  (Cameron-Schimann, 1978; Parslow i in., 1985;

Lumpkin & Chakoumakos, 1988; Bowles, 1990), a przy użyciu mikros sondy protonowej (PIXE) także cyrkon —  $\text{ZrSiO}_4$  (Lukas i in., 1981). Autorzy tych prac nie brali pod uwagę obecności ołowiu pierwotnego ( $\text{Pb}^0$ ) w minerale, a miarą zgodności systemu Th-U-Pb była obecność Ca. Odkrycie więc, że całkowita ilość ołowiu (Pb) w monacycie ( $\text{REEPO}_4$ ) jest pochodzenia radiogenicznego, a zawartość  $\text{Pb}^0$  nie przekracza 1 ppm (Parrish, 1990), pozwoliło na szerokie zastosowanie monacytu do datowania przy użyciu mikros sondy elektronowej oraz protonowej.

### Izotopowe kontra nieizotopowe metody datowania

Szybki rozwój geochronologii i technik datowania izotopowego przyczynił się do rozwoju wysokiej klasy sprzętu analitycznego. Powstały m.in.: SIMS (*secondary ion mass spectrometry*), SHRIMP (*sensitive high resolution ion microprobe*), LA-ICP-MS (*laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry*) czy ID-TIMS (*isotope dilution-thermal ionisation mass spectrometry*). Jednak nie wszystkie laboratoria dysponują takim sprzętem, a i samo wykonanie analiz często przekracza możliwości finansowe naukowców. Metody chemicznego datowania nie są tak precyzyjne jak metody datowania izotopowego, lecz ich niski koszt, łatwość preparatyki oraz dostępność sprzętu spowodowały, iż od kilku lat są one powszechnie stosowane w geochronologii. Wykorzystywana w metodzie chemicznej mikrowiązka elektronowa, mając o wiele większą rozdzielczość przestrzenną od jonowej, daje możliwość analizowania wielu punktów w ziarnie, a tym samym możliwość rozpoznania różnych etapów jego krystalizacji i rekrystalizacji. Porównanie zalet i wad obu metod przedstawiono w tabeli 1. Mineralem najczęściej datowanym za pomocą metody chemicznej jest monacyt, ale w podobny sposób mogą być też analizowane cyrkon, ksenotym i allanit. Poziom wykrywalności ołowiu za pomocą mikros sondy elektronowej wyznacza granicę precyzji obliczonego wieku chemicznego. Głównym problemem analitycznym jest niska zawartość ołowiu w cyrkonie, często poniżej poziomu wykrywalności EMP.

W metodzie chemicznej zakładamy, że monacyt podczas wzrostu nie dopuszcza do swojej struktury ołowiu (Scherrer i in., 2000). Aby można było datować minerał przy użyciu EMP bądź PIXE, powinny być spełnione co najmniej dwa warunki: 1) całkowita ilość ołowiu musi pocho-

Tab. 1. Porównanie zalet i wad izotopowych i nieizotopowych metod datowania minerałów

Metody izotopowe SHRIMP, CAMECA-ion microprobe, LA-ICPMS	Metody nieizotopowe EMP, PIXE
Pomiar stosunków izotopów dla systemów U, Th, Pb	Pomiar koncentracji pierwiastków U, Th, Pb
Duża precyzja	Duży błąd pomiaru
Mała rozdzielczość przestrzenna	Mniejszy obszar analizy — wysoka rozdzielczość przestrzenna
Analizowana powierzchnia minerału ulega zniszczeniu	Analizowana powierzchnia minerału nie ulega zniszczeniu

dzić z rozpadu radiogenicznego toru i uranu; 2) system był zamknięty, czyli nie było wymiany radiogenicznej od czasu krystalizacji minerału.

### Monacyt jako obiekt badań geochronologicznych

Monacyt jest fosforanem pierwiastków lekkich ziem rzadkich ( $\text{REEPO}_4$ ). Jego nazwa pochodzi od greckiego monazeis = jedyny lub monaxo = być samotnym. Nawiązuje ona do rzadkości występowania tego minerału (Breithaupt, 1829; za Overstreet, 1967). Monacyt należy do trójczłonowego szeregu izomorficznego (Burke & Ferraris, 2006):

- 1)  $2\text{REEPO}_4$  — monacyt-(Ce), -(La), -(Nd) i -(Sm);
- 2)  $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$  — cheralit;
- 3)  $2\text{ThSiO}_4$  — huttonit.

Ze względu na zawartość U i Th (średnio 6–11% wag.  $\text{ThO}_2$  oraz 0,5–2% wag.  $\text{UO}_2$ ) monacyt jest jednym z najbardziej radioaktywnych minerałów (po uraninie, thorianie i thorycie). Ta cecha sprawia, iż jest on bardzo użytecznym narzędziem w geochronologii izotopowej (metody U/Pb oraz Sm/Nd; np. Parrish & Turrill, 1989; Krohe & Wawrzenitz, 2000), jak również w datowaniu chemicznym (Suzuki & Adachi, 1991; Montel i in., 1996; Cocherie i in., 1998). Skomplikowany skład chemiczny monacytu jest wynikiem licznych podstawień, np.:

- 1)  $\text{Th}^{4+}$  (lub  $\text{U}^{4+}$ ) +  $\text{Si}^{2+} = \text{REE}^{3+} + \text{P}^{5+}$  (huttonit w monacycie, thoryt w ksenotymie, z Si podstawiającą P w koordynacji tetraedrycznej; Pabst & Hutton, 1951);
- 2)  $\text{Th}^{4+}$  (lub  $\text{U}^{4+}$ ) +  $\text{Ca}^{2+} = 2\text{REE}^{3+}$  (brandyt z Ca podstawiającym dodatkowe REE w koordynacji oktaedrycznej; Rose, 1980).

Ołów radiogeniczny ( $\text{Pb}^*$ ), który powstał na skutek rozpadu U i Th w monacycie, jest umieszczany w strukturze tego minerału, dlatego też nie występuje tendencja do utraty ołowiu, jak to ma miejsce w cyrkonie (Bosch i in., 2002). W odróżnieniu od cyrkonu monacyt nie ulega metamiktyzacji — jest mniej podatny na defekty sieci podczas rozpadu radiogenicznego, dlatego też w warunkach powierzchniowych uwalnianie Pb ze struktury monacytu jest minimalne. Temperatura, powyżej której zachodzi dyfuzja ołowiu poza strukturę minerału, czyli tzw. temperatura zamknięcia monacytu, była oceniana na  $> 720^\circ\text{C}$  (Copeland i in., 1988; Smith & Barreiro, 1989; Smith &

\*Instytut Nauk Geologicznych, Polska Akademia Nauk, Ośrodek Badawczy w Krakowie, ul. Senacka 1, 31-002 Kraków;

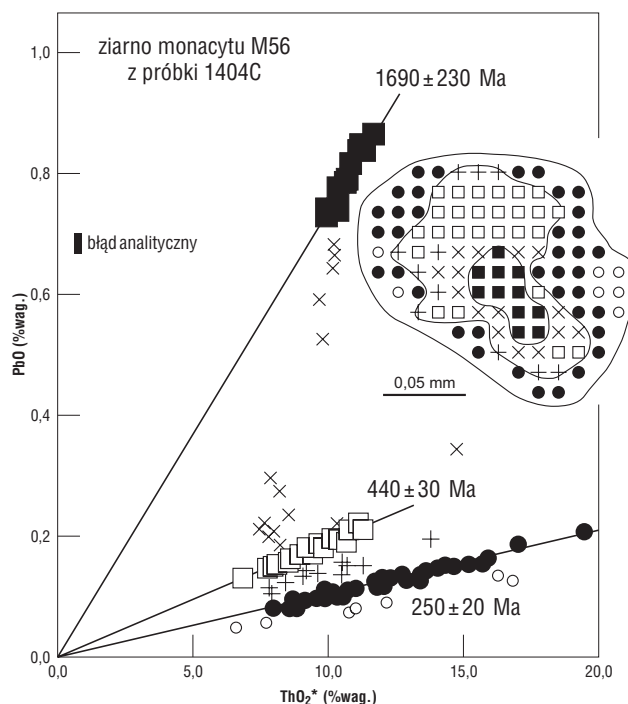
\*\*Nagoya University Center for Chronological Research, 464-8602 Nagoya, Japan

Giletti, 1997). Jednak wyniki nowszych badań eksperymentalnych wskazują na to, że temperatura zamknięcia monacytu jest podobna do temperatury zamknięcia cyrkonu — wynosi  $\sim 900^\circ\text{C}$  (Cherniak & Watson, 2001; Cherniak i in., 2004). Oznacza to, że wieki izotopowe Pb-U oraz Pb-Th nie mogą być łatwo zresetowane poprzez efekt termiczny, z wyjątkiem najbardziej ekstremalnych warunków metamorfizmu facji granulitowej lub częściowego wytopienia. Co więcej, temperatura ta jest wyższa od temperatury wielu magm granitowych ( $\sim 750\text{--}850^\circ\text{C}$ ), co wyjaśnia częste występowanie i przetrwanie monacytu w granitach oraz wysokotemperaturowych skałach metamorficznych. Monacyt jest uważany za minerał odporny na zaburzeniowe procesy pokryształizacyjne (Finger & Helmy, 1998). Niektórzy autorzy wskazują na to, że w zależności od warunków geologicznych, w jakich występuje monacyt, może on mieć odmienne właściwości, np. akumulować nadmiar  $^{206}\text{Pb}$  (Parrish, 1990),  $^{204}\text{Pb}$  (Catlos i in., 2002), zawierać niedopasowany Pb\* (Copeland i in., 1988), tracić ołów (Pb loss; Catlos i in., 2002), a także wbudowywać w swoją strukturę ołów pierwotny (Seydoux-Guillaume i in., 2002). Seydoux-Guillaume i in. (2003) twierdzą, że podczas rekrystalizacji czy rozpuszczania może czasem dojść do ucieczki Pb z monacytu. Jednak Finger i in. (1998) sugerują, że monacyt nie traci Pb, bądź też traci go bardzo niewiele, a błędne wieki monacytu można otrzymać na skutek analizowania frakcji monacytów z koronami wtórnymi, zawierającymi metamorficzny składnik U-Pb. Inną przyczyną błędnych wieków monacytów może być ucieczka ołowiu radiogenicznego, która nastąpiła podczas metamorfizmu, np. poprzez dyfuzję różnie zorientowanych domen lub też w skali submikroskopowej (Black i in., 1984), a system U-Pb nie został całkowicie zresetowany.

### Datowanie chemiczne

Na szeroką skalę datowanie chemiczne po raz pierwszy zastosowali Japończycy (Suzuki & Adachi, 1991; Suzuki i in., 1991), badając monacyt, cyrkon, ksenotym, polikraz i allanit. Naukowcy ci analizowali wiele punktów w ziarnie różnicowanym chemicznie i skonstruowali izochronę, otrzymując diagram zależności Pb od Th\* z krzywą regresji przedstawiającą wiek (ryc. 1). Metodę tę nazwano Chemical Th-U-total Pb Isochron Method (CHIME). Th\* jest sumą zawartości analizowanego Th oraz Th „zrównoważonego”, gdzie Th „zrównoważony” jest to ilość Th, z rozpadu którego powstałaby taka sama ilość Pb\*, jaka powstała z rozpadu U od momentu zamknięcia systemu. Zaletą metody CHIME jest to, że izochronę możemy wyznaczyć z ziaren o różnej zawartości U czy Th, a więc niehomogenicznych. Technika ta, oparta na metodzie regresji, pozwala na badanie minerałów zawierających pewne ilości Pb<sup>0</sup>, a także na identyfikację kilku homogenicznych domen wiekowych, oddzielonych od siebie w większym zakresie niż błąd analityczny pojedynczego pomiaru wieku. Pewnym testem poprawności wyników jest to, czy izochrona przechodzi przez początek układu współrzędnych. Przesunięcie izochrony ku górze jest dowodem na obecność Pb<sup>0</sup>, co powoduje zawyżenie wieku. Natomiast przecięcie osi x przez izochronę oznacza ucieczkę ołowiu i zaniżenie wieku.

Pięć lat później Montel i in. (1996) nieznacznie zmodyfikowali tę metodę. Jej teoretyczne założenia pozostały takie same, jednak nie jest to już metoda izochronowa. Montel i in. (1996) założyli, że w mineralu nie występuje ołów pierwotny (Pb<sup>0</sup>), a wyniki przedstawili za pomocą



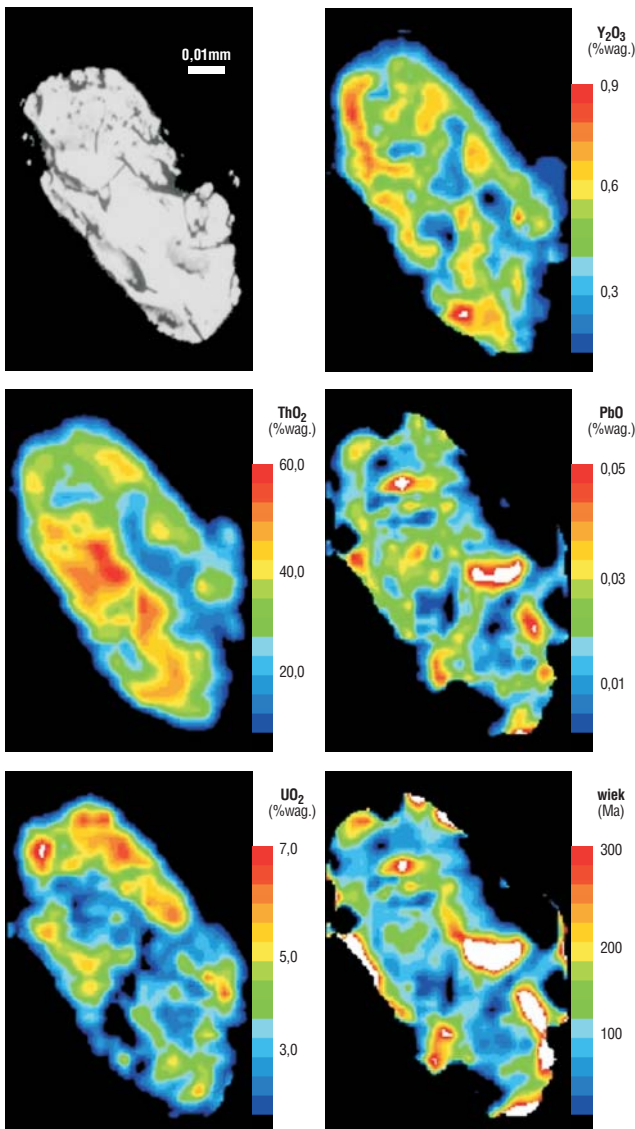
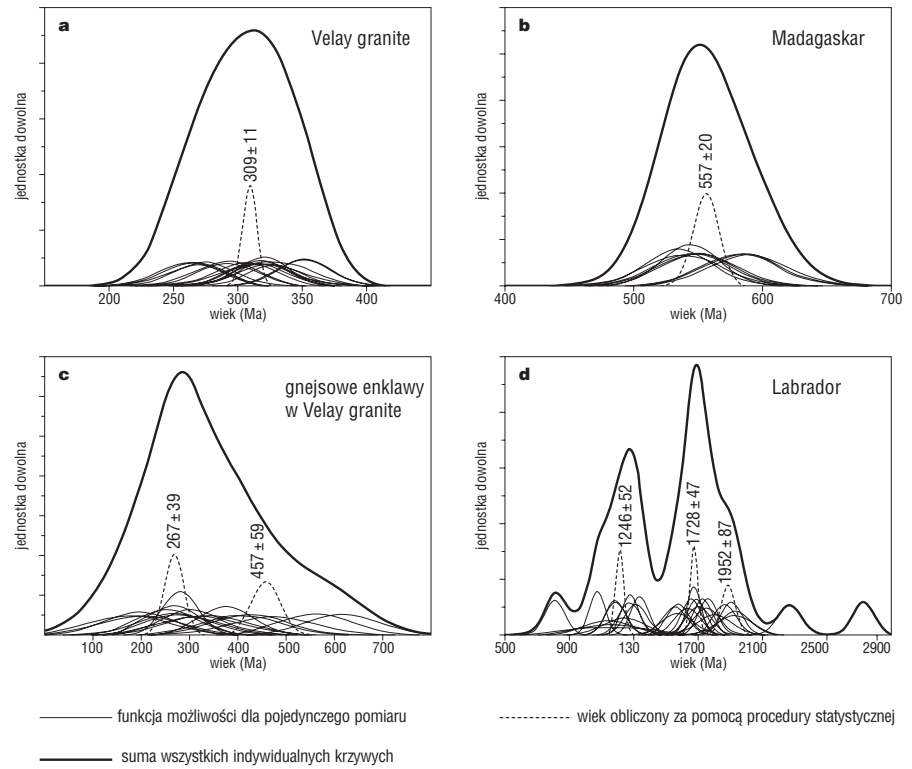
**Ryc. 1.** Wykres PbO w zależności od ThO<sub>2</sub>\* oraz przekrój monacytu ukazujący analizowane punkty (ziarno M56 z próbki 1404C). Wieki jądra ziarna (czarne kwadraty), otoczenia jądra (białe kwadraty) oraz brzegów ziarna (czarne koła) zostały przedstawione na oddzielnych izochronach. Punkty zewnętrzne (białe koła) są zmetamiktizowane. Krzyżkami zaznaczono te wieki, które nie należą do żadnej z izochron. Błąd analityczny wieku wynosi 2σ (Suzuki & Adachi, 1994)

rozkładu normalnego (krzywej Gaussa; ryc. 2). Należy dodać, że nie ma możliwości sprawdzenia, czy w monacycie rzeczywiście nie występuje ołów pierwotny. Montel i in. (1996) jako pierwsi zastosowali datowanie chemiczne jako metodę *in situ* (umożliwiająca zachowanie teksturalnych stosunków pomiędzy ziarnami datowanymi a sąsiednimi), a nie z separowanych ziaren. Montel zwrócił większą uwagę na błędy pomiarów wieku i ich przeliczenia statystyczne.

Wkrótce potem Williams i in. (1999) opracowali tzw. mapy wieku, na których widać domeny wiekowe ziarna. Zaproponowali oni wyznaczenie tzw. map rozkładu Th, U oraz Pb na powierzchni ziarna oraz map domen wiekowych. Z takich zdjęć można odczytać obraz ziarna i rozkład domen przed przystąpieniem do analiz ilościowych. Ułatwiają one wybór punktów analitycznych oraz interpretację uzyskanych wieków. Zasady wykonywania map wieku zostały przedstawione przez Goncalves i in. (2005). Metoda ta jest jednak zbyt czasochłonna, by mogła być metodą rekonesansową. Z tego względu większość użytkowników EMP preferuje analizę punktu, a mapy ziaren są wykonywane sporadycznie, zwłaszcza że w wielu przypadkach domeny pierwiastkowe Th i U nie wiążą się z domenami wiekowymi (ryc. 3). Zmienność kontrastu w obrazach BSE większości ziaren monacytu jest spowodowana głównie zróżnicowaniem zawartości Th i Y w poszczególnych domenach.

Kolejnym krokiem w rozwoju datowania chemicznego było skonstruowanie diagramu U/Pb w zależności od Th/Pb, który zaproponowali Cocherie i in. (1998), a potem udoskonalili (Cocherie & Albarede, 2001; ryc. 4). Takie przedstawienie wyników jest najlepsze, gdyż minimalizuje

**Ryc. 2.** Histogram wieku. Każda z małych krzywych reprezentuje funkcje możliwości pojedynczego pomiaru. Gruba krzywa jest sumą wszystkich indywidualnych krzywych (Montel i in., 1996)



odstępstwa od linii regresji, a także zachowuje informację o wartości stosunku Th do U. Jednakże w przypadku heterogenicznego rozkładu Th i U w ziarnie monacytu wykres ten jest bardzo skomplikowany i nieczytelny.

Kilka lat później również mikrosonda protonowa PIXE została wykorzystana do określania wieku monacytów (Mazzoli i in., 2002; Lekki i in., 2003). Umożliwiła ona wykrywanie mniejszej zawartości pierwiastka w minerałach (co może posłużyć do datowania cyrkonów), z lepszą rozdzielczością przestrzenną niż mikrosonda elektronowa (daje to możliwość analizowania nawet 2–3-mikronowych zon w ziarnie).

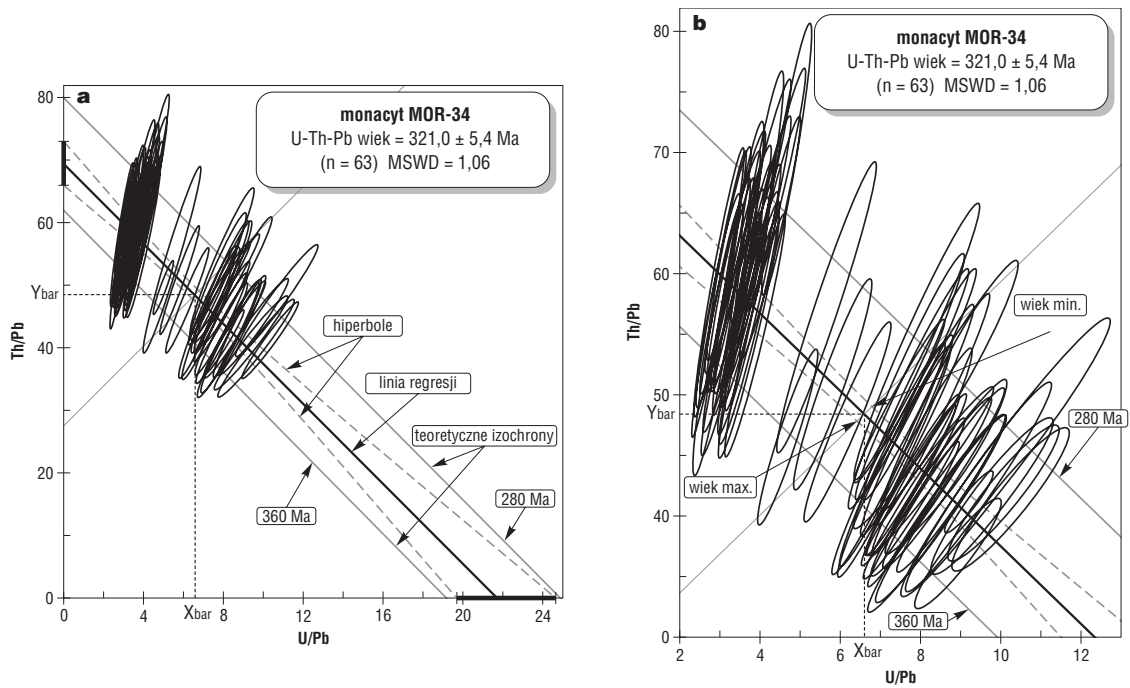
W ciągu ostatnich lat metody datowania chemicznego zaczęły być szeroko wykorzystywane na całym świecie, dlatego zaczęto podejmować wysiłki w kierunku ujednoczenia warunków analizy i standardów międzynarodowych. Najnowsze prace są poświęcone dokładności datowania chemicznego (Suzuki, 2005; Pyle i in., 2005b; Lisowiec, 2006; Williams i in., 2006; Williams i in., 2007) oraz eksperymentom z datowaniem innych minerałów niż monacyt i cyrkon (Cocherie & Legendre, 2007).

### CHIME w Polsce

W Polsce pierwsza praca poświęcona datowaniu chemicznemu ukazała się na konferencji Datowanie Mineraleń i Skał w Lublinie (Michalik & Paszkowski, 1997). Autorzy podjęli próbę oznaczenia wieku monacytów tatrzańskich na podstawie bezwzorcowej analizy SEM-EDS. Ogólne założenia metody datowania chemicznego przedstawili Kusiak i in. (2000), Kusiak i Paszkowski (2003) oraz



**Ryc. 3.** Obraz BSE z mikroskopu elektronowego wraz z mappin-giem pierwiastkowym oraz wiekowym ziarna huttonitu z durbachitu pochodzącego z plutonu Trębiec (Czechy), wykonany za pomocą mikrosondy elektronowej JEOL-733. Zonacja wiekowa nie odpowiada zonacji zawartości Th oraz Y w ziarnie



**Ryc. 4.** Diagram Th/Pb w zależności od U/Pb dla monacytu (MOR-34) z granitu anatektycznego z Francji (z pracy Cocherie & Albarede, 2001). **A** — Linia regresji (grubsza) i dwie teoretyczne izochrony 280 oraz 360 Ma (linie cienkie) mają takie samo nachylenie. Zakres błęd (linia przerywana) odpowiada dwóm symetrycznym hiperbodom. Przecięcie linii regresji z osiami U/Pb oraz Th/Pb, daje wiek U-Pb  $319 \pm 40$ – $32$  mln lat, a wiek Th-Pb  $322 \pm 17$ – $15$  mln lat. Wiek ten są obliczane na linii regresji, gdzie błąd jest największy. **B** — Wiek jest obliczony na podstawie punktu uśrednionego ( $X_{bar}$ ,  $Y_{bar}$ ) najbardziej dopasowanej linii, a błąd obliczony z hiperboli

Budzyń i Kusiak (2005) — prace w języku polskim; a także Kryza (2003) — w języku angielskim. Na temat datowania chemicznego pisali również Lekki i in. (2003), Mikulski i in. (2004), Kryza i in. (2004), Kusiak i in. (2004), Michalik i in. (2004), Poprawa i in. (2004, 2005, 2006), Gawęda i Burda (2005), Bagiński (2006), Budzyń i in. (2006a, b), Manecki i in. (2006) oraz Kusiak i in. (2006a i b).

**Podstawy metody**

W metodzie tej ustala się przybliżony wiek ziarna (t) na podstawie złożonej kalkulacji, opartej na wzajemnych stosunkach zawartości  $UO_2$ ,  $ThO_2$  oraz  $PbO$  (w % wag.), mierzonych za pomocą mikrosondy (najczęściej elektronowej EMP). Podstawą metody są stałe rozpadu ( $\lambda$ ) poszczególnych izotopów:

$$^{232}Th \Rightarrow ^{208}Pb : ^{208}Pb = ^{232}Th \{ \exp(\lambda_{232}t) - 1 \} : \lambda_{232} = 4,9475 \times 10^{-11} y^{-1}$$

$$^{235}U \Rightarrow ^{207}Pb : ^{207}Pb = ^{235}U \{ \exp(\lambda_{235}t) - 1 \} : \lambda_{235} = 9,8485 \times 10^{-10} y^{-1}$$

$$^{238}U \Rightarrow ^{206}Pb : ^{206}Pb = ^{238}U \{ \exp(\lambda_{238}t) - 1 \} : \lambda_{238} = 1,55125 \times 10^{-10} y^{-1}$$

Wiek jest obliczany ze wzoru (Suzuki i in., 1994):

$$\text{Całkowity Pb} = Pb_{\text{pierwotny}} + ^{208}Pb + ^{207}Pb + ^{206}Pb$$

$$= Pb_{\text{pierwotny}} + ^{232}Th \{ \exp(\lambda_{232}t) - 1 \} + ^{235}U \{ \exp(\lambda_{235}t) - 1 \} + ^{238}U \{ \exp(\lambda_{238}t) - 1 \}$$

Stosunek  $^{238}U/^{235}U = 137,88$  (Steiger & Jäger, 1977). Program do obliczania wieku jest dostępny na stronie [www.nendai.nagoya-u.ac.jp/gsd/CHIME](http://www.nendai.nagoya-u.ac.jp/gsd/CHIME) (Kato i in., 1999).

Obecnie stosuje się kilka protokołów analiz. Parę lat temu zebrał je w swojej pracy Scherrer i in. (2000). Najnowsze protokoły analityczne są publikowane przez laboratoria (Konečný i in., 2004; Suzuki, 2005; Pyle i in., 2005; Williams i in., 2006). Wybór napięcia przyspieszającego (*accelerating voltage*) do pomiarów zależy przede wszystkim od ilości energii potrzebnej do wzbudzenia charakterystycznych linii X. Do pomiarów wieku monacytu najczęściej stosuje się napięcie w zakresie 15–25 keV (tab. 2). Zwiększe-

**Tab. 2.** Warunki analiz

Autor analiz	Typ mikrosondy	Napięcie przyspieszające	Natężenie prądu	Linia analityczna		
Cocherie	Cameca SX50	20 kV	100 nA	UMβ	ThMα	PbM α
Dzierżanowski	Cameca SX100	20 kV	50–150 nA	UMβ	ThMα	PbM β
French	JEOL 8900	20 kV	150 nA	UMβ	ThMα	PbM α
Geisler	Cameca CAMEBAX	15–25 kV	20, 100 nA	UMα	ThMα	PbM α
Montel	Cameca CAMEBAX	15 kV	100 nA	UMβ	ThMα	PbM α
Pyle	JEOL 733	25 kV	200 nA	UMβ	ThMα	PbM α
Scherrer	Cameca SX50	15 kV	50 nA	UMβ	ThMα	PbM β
Suzuki	JEOL 733	25 kV	150–200 nA	UMβ	ThMα	PbM α
Williams & Jercinovic	Cameca SX50	25 kV	150 nA	UMβ	ThMα	PbM α
	Cameca Ultrachron	15 kV	200 nA	UMβ	ThMα	PbM α

nie napięcia powoduje wzrost intensywności promieniowania, czyli większy pik w stosunku do tła, natomiast mniejsze napięcie przyspieszające (ok. 15 kV) daje lepszą rozdzielczość przestrzenną. Kombinacja natężenia prądu i czasu zliczania wpływa na obniżenie limitu detekcji, lecz może się przyczynić do zniszczenia próbki.

Preparaty do datowania metodą chemiczną przygotowujemy w taki sam sposób, w jaki przygotowujemy inne preparaty do mikrosondy elektronowej. Mogą być stosowane zarówno polerowane płytki cienkie, jak i preparaty wykonane z wyseparowanych ziaren, polecane szczególnie do analizowania monacytów detrytycznych. Informacje na temat preparatyki oraz separacji minerałów zawarł w swej pracy Paszkowski i in. (1999).

**Pierwiastki analizowane.** Nie ma pełnej zgodności w kwestii wyboru pierwiastków niezbędnych do dokładnej analizy. Są dwie tendencje:

□ analiza całościowa wszystkich pierwiastków w monacycie (ok. 18), tak by oprócz wieku mieć również rozkład REE. Analizowane są wówczas: Th, U, Pb, Y + Ca, Si, La-Gd, (Er?), P oraz HREE. Jedna analiza trwa ok. 15–27 minut.

□ analiza pierwiastków niezbędnych do przeliczenia wieku, tzn. Th, U oraz Pb, a ze względu na nakładanie się linii i konieczność korekcji analizuje się również Y. Wykorzystuje się wtedy tak zwaną matrycę składu chemicznego monacytu. W celu zwiększenia dokładności analizy czas uzyskany przez pominięcie niektórych pierwiastków można wykorzystać do dłuższego pomiaru zawartości Pb oraz U.

Jeśli nie decydujemy się na analizę wszystkich pierwiastków w monacycie, to pewnym pośrednim rozwiązaniem jest wybór (oprócz Th, U i Pb) następujących pięciu pierwiastków: Y, Ca, Si, S i K. Analizując te pierwiastki, możemy sprawdzić ewentualne podstawienia cheralitu (Ca), brabandytu (Ca) czy huttonitu (Si) w monacycie, a jednocześnie czas analizy będzie skrócony do kilku minut. W strukturze monacytu występują ponadto podstawienia As oraz Sr, dlatego warto zbadać zawartość również i tych pierwiastków (Ondrejka i in., 2007; Kusiak i in., w druku). Monocyty zawierające pewne ilości S dają najczęściej błędne wieki (Sun & Suzuki, 2004; Kusiak i in. 2006b). Protokół analityczny stosowany w Nagoya (Kusiak i in., 2006a; Suzuki, 2005) oraz w Troy (Pyle i in., 2005) jest kompromisem pomiędzy pełną analizą monacytu a analizą pierwiastków niezbędnych do przeliczenia wieku.

**Nakładanie się pików — interferencje.** Precyzja pomiaru wieku monacytu jest zależna od precyzji oznaczeń Th, U oraz Pb. Zarówno U, jak i Pb występują zwykle w niewielkich ilościach. Poza torem, który zawsze powinien być oznaczany za pomocą linii  $M\alpha$ , wolnej od wszelkich głównych interferencji, linie pozostałych pierwiastków nakładają się na siebie (tab. 3), dlatego należy dokonać korekcji pomiaru. Najbardziej problematyczny jest pomiar

Tab. 3. Nakładanie się pików

Linia	Linie, które się nakładają
$Th_{M\alpha}$	jest wolna od wszelkich istotnych interferencji
$U_{M\alpha}$	$Th_{M\beta 1}$
$U_{M\beta}$	$Th_{M\gamma 1, 2}$ (mniejsza korekcja)
$Pb_{M\alpha}$	$Th_{M\zeta}, Y_{L\gamma}$
$Pb_{M\beta}$	$U_{M\zeta}$

zawartości ołowiu i wybór pomiędzy liniami  $M\alpha$  i  $M\beta$ . Linia  $Pb_{M\beta}$  jest o ok. 20% mniej intensywna od linii  $M\alpha$ , ale jest mniej zaburzona przez interferencje od  $Pb_{M\alpha}$  ( $Th_{M\zeta 1}$ ,  $Th_{M\zeta 2}$  i  $Y_{L\gamma 2,3}$ ) i w niektórych przypadkach pomiar  $Pb_{M\beta}$  daje bardziej precyzyjne wyniki. Proponowany przez Suzukiego protokół zawiera korekcje następujących linii spektralnych:

- 1)  $Y_{L\gamma}$  i  $Th_{M\zeta}$  na linii  $Pb_{M\alpha}$ ;
- 2)  $Th_{M\gamma}$  na linii  $U_{M\beta}$ .

Scherrer i in. (2000) zauważyli, że pomiar  $Pb_{M\alpha}$  i  $U_{M\alpha}$  dają wynik o ok. 30 Ma starszy (dla ok. 400 Ma) niż przy użyciu  $Pb_{M\beta}$  i korekcji  $U_{M\beta}$ .

**Używane standardy.** Do tej pory nie ujednolicono standardów wykorzystywanych do pomiaru wieku monacytu. Nadal nie ma zgodności co do tego, czy wzorce syntetyczne są najlepsze. Jako wzorec wiekowy monacytu jest proponowany monacyt Namaqualand, który być może będzie niedługo używany przez większość laboratoriów. W tabeli 4 podano kilka przykładowych wzorców używanych dla niektórych pierwiastków. Preferowane przez niektóre laboratoria (np. Montel) szkła syntetyczne nie zawsze są dobrymi wzorcami, ponieważ w wysokich natężeniach prądu, pod skoncentrowaną wiązką, zachowują się niestabilnie.

Tab. 4. Wzorce stosowane w kalibracji poszczególnych pierwiastków

Pierwiastek	Wzorec
U	euksenit $UO_2$
Th	euksenit $ThO_2$ , $ThSiO_4$ (bywa niestabilny), $ThP_2O_7$
Pb	syntetyczne szkło Pb ( $PbO = 10\%$ ), krokoit, wanadynit, syntetyczne $PbSiO_3$
Y	syntetyczne szkło K-Y-Ca-Mg-Al-Si ( $Y_2O_3 = 10\%$ i $K_2O = 5\%$ ), YAG
REE	szkło syntetyczne, apatyt, stechiometryczne fosforany REE

## Podsumowanie

Przedstawione problemy analityczne nie wyczerpują oczywiście tematu, jednak mogą być przydatne podczas wyboru metody wykonywania analiz. Metoda chemicznego datowania może służyć do: 1) szybkiego datowania — na przykład detrytycznych monacytów (Kusiak i in., 2006a); 2) identyfikacji skał, które przeszły kilka wysokotemperaturowych przemian, na przykład granulitów; 3) uzyskania wieków próbek i informacji o mikroteksturze (Dahl i in., 2005; Dunkley i in., w druku) oraz 4) rekonstrukcji ewolucji skał polimetamorficznych, np. skał pochodzących z Kopyły Orlicko-Śnieżnickiej i Gór Sowich (Gordon i in., 2005). Zazwyczaj do interpretacji i dyskusji otrzymanych danych geochronologicznych niezbędna jest korelacja wyników z analizą mikrostrukturalną, wykonywaną przy użyciu płytki cienkiej (Williams & Jercinovic, 2002; Mahan i in., 2006). Zainteresowanych tematem napyłania preparatów (grubością napyłanego węgla czy też metodą napyłania preparatów złotem) odsyłam do publikacji Jercinovic & Williams (2005). Warto wspomnieć też o zrozumieniu reakcji prowadzących do krystalizacji czy też rekrystalizacji minerałów, które datujemy (Bingen i in., 1996; Finger i in., 1998; Broska & Siman, 1998; Simpson i in., 2000; Poitrasson i in., 2002; Wing i in., 2003; Krenn & Finger, 2007; Majka i Budzyń, 2006;

Budzyń i in., 2007). Datowanie za pomocą mikrosondy elektronowej lub protonowej jest metodą nieniszczącą, o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (do 1 µm), co jest jej niewątpliwą zaletą. Wiek przeliczone metodą CHIME są wiarygodne, jeśli poziom ołowiu pierwotnego jest zanedbywalny (tzn. poniżej 1 ppm) oraz jeśli nie było żadnej modyfikacji stosunku U/Th/Pb, z wyjątkiem rozpadu radiogenicznego (Montel i in., 1996; Harrison i in., 2002). Należy pamiętać, że metoda CHIME nie jest tak precyzyjna jak datowania izotopowe U-Pb metodą SHRIMP. Jest to jednak znakomita metoda do wstępnych oszacowań wieku.

Pragnę podziękować K. Suzukiemu, który wprowadził mnie w tematykę CHIME. Dziękuję również J. Wiszniewskiej, N. Bakun-Czubarow, B. Bagińskiemu i P. Dzierżanowskiemu za dyskusje i krytyczne uwagi, które przyczyniły się do udoskonalenia tekstu, a także B. Budzyniowi, M. Paszkowskiemu oraz D. Dunkleyowi za rozmowy o dokładności i precyzji w geochronologii.

### Literatura

- BAGIŃSKI B. 2006 — Different ages recorded by zircon and monazite in charnockitic rocks from the Łanowicze borehole (NE Poland). *Miner. Pol., Special Papers*, 29: 79–82.
- BINGEN B., DEMAÏFFE D. & HERTOGEN J. 1996 — Redistribution of rare earth elements, thorium, and uranium over accessory minerals in the course of amphibolite to granulite facies metamorphism: The role of apatite and monazite in orthogneisses from southwestern Norway. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1341–1354.
- BLACK L.P., FITZGERALD J.D. & HARLEY S.L. 1984 — Pb isotopic composition, colour and microstructure of monazites from a polymetamorphic rock in Antarctica. *Contrib. Miner. Petrol.*, 85: 21–38.
- BOSCH D., HAMMOR D., BRUGUIER R., CABY R. & LUCK J.M. 2002 — Monazite “in situ”, <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb geochronology using a small geometry high-resolution ion probe: Application to Archaean and Proterozoic rocks. *Chem. Geol.*, 184: 151–165.
- BOWLES J.F.W. 1990 — Age dating of individual grains of uraninite in rocks from electron-microprobe analyses. *Chemical Geology*, 83: 47–53.
- BROSKA I. & SIMAN P. 1998 — The breakdown of monazite in the West-Carpathian veepic orthogneisses and Tatric granites. *Geol. Carpath.*, 49: 161–167.
- BUDZYŃ B., HETHERINGTON C.J., WILLIAMS M.L., JERCINOVIC M.J. & MICHALIK M. 2007 — Monazite stability as a function of the silicate mineral assemblage in the presence of fluid. *Geophysical Research Abstracts*, 9, 1607–7962/00100, 1–2.
- BUDZYŃ B., KONEČNÝ P. & MICHALIK M. 2006a — Breakdown of primary monazite and formation of secondary monazite in gneiss clasts from Gródek at the Jezioro Rożnowskie Lake (Poland). *Miner. Pol. — Special Papers*, 28: 33–35.
- BUDZYŃ B., KONEČNÝ P., MICHALIK M., MALATA T. & POPRAWA P. 2006b — U-Th-total Pb dating of primary and secondary monazite formation in gneiss and granulite clasts from the Silesian Unit (Western Outer Carpathians, Poland). *Geol. Soc. America — Abstracts with Programs*, 38 (7), #108349.
- BUDZYŃ B. & KUSIAK M.A. 2005 — Geochronologia — zarys możliwości i zastosowań wybranych metod. *Wszechświat*, 106: 102–105.
- BURKE E.A.J. & FERRARIS G. 2006 — New minerals approved in 2006 nomenclature modifications approved in 2006 by the commission on new minerals and mineral names. *International Mineralogical Association*.
- CAMERON-SCHIMANN M. 1978 — Electron microprobe study of uranium minerals and its application to some Canadian deposits. *Arch. University of Alberta*.
- CATLOS E.J., GILLEY L.D. & HARRISON T.M. 2002 — Interpretation of monazite ages obtained via in situ analysis. *Chemical Geology*, 188: 193–215.
- CHERNAK D.J. & WATSON E.B. 2001 — Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172: 5–24.
- CHERNAK D.J., WATSON E.B., GROVE M. & HARRISON T.M. 2004 — Pb diffusion in monazite: A combined RBS/SIMS study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68: 829–840.
- COCHERIE A. & ALBAREDE F. 2001 — An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65: 4509–4522.
- COCHERIE A. & LEGENDRE O. 2007 — Potential minerals for determining U-Th-Pb chemical age using electron microprobe. *Lithos*, 93: 288–309.
- COCHERIE A., LEGENDRE O., PEUCAT J.J. & KOUAMELAN O. 1998 — Geochronology of polygenic monazites constrained by in situ electron microprobe Th-U-total lead determination: Implications for lead behaviour in monazite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 2475–2497.
- COPELAND P., PARRISH R.R. & HARRISON T.M. 1988 — Identification of inherited radiogenic Pb in monazite and its implications for U-Pb system. *Nature*, 333: 760–763.
- DAHL P.S., TERRY M.P., JERCINOVIC M.J., WILLIAMS M.L., HAMILTON M.A., FOLAND K.A., CLEMENT S.M. & FRIBERG L.M. 2005 — Electron probe (Ultrachron) microchronometry of metamorphic monazite: Unraveling the timing of polyphase thermotectonism in the easternmost Wyoming Craton (Black Hills, South Dakota). *American Mineralogist*, 90: 1712–1728.
- DUNKLEY D.J., SUZUKI K., HOKADA T. & KUSIAK M.A. 2007 — Age contrasts between isotopic chronometers in a granulite terrane: timing metamorphism in the Higo Complex, Japan. *Gondwana Research* (w druku).
- FINGER F., BROSKA I., ROBERTS M.P. & SCHERMAIER A. 1998 — Replacement of primary monazite by apatite-allanite-epidote coronas in an amphibolite facies granite gneiss from the eastern Alps. *American Mineralogist*, 83: 248–258.
- FINGER F. & HELMY H.M. 1998 — Composition and total-Pb model ages of monazite from high-grade paragneisses in the Abu Swayel area, southern Eastern Desert, Egypt. *Mineralogy and Petrology*, 62: 269–289.
- GAWĘDA A. & BURDA J. 2005 — Partial melting processes in the Western Tatra Mts.: geochronological and geochemical study. *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 26: 162–166.
- GONCALVES P., WILLIAMS M.L. & JERCINOVIC M.J. 2005 — Electron-microprobe age mapping of monazite. *American Mineralogist*, 90: 578–585.
- GORDON S.M., SCHNEIDER D.A., MANECKI M. & HOLM D.K. 2005 — Exhumation and metamorphism of an ultrahigh-grade terrane: geochronometric investigations of the Sudete Mountains (Bohemia), Poland and Czech Republic. *J. Geol. Soc.*, 162: 841–855.
- HARRISON T.M., CATLOS E.J. & MONTEL J.M. 2002 — U-Th Pb dating of phosphate minerals. [In:] *Phosphates: Geochemical, Geobiological and Materials Importance*, M.J. Kohn, J. Rakovan & J.M. Hughes (ed). *Rev. Miner. Geochem.*, 48: 523–558.
- JERCINOVIC M.J. & WILLIAMS M.L. 2005 — Analytical perils (and progress) in electron microprobe trace element analysis applied to geochronology: Background acquisition, interferences, and beam irradiation effects. *American Mineralogist*, 90: 526–546.
- KATO T., SUZUKI K. & ADACHI M. 1999 — Computer program for the CHIME age calculation. *Journal of Earth and Planetary Science, Nagoya University* 46: 49–56.
- KONEČNÝ P., SIMAN P., HOLICKÝ I., JANÁK M. & KOLLÁROVÁ V. 2004 — Metodika datovania monazitu pomocou elektrónového mikroanalýzátora. *Mineralia Slovaca*, 36: 225–235.
- KRENN E. & FINGER F. 2007 — Formation of monazite and rhabdophane at the expense of allanite during Alpine low temperature retrogression of metapelitic basement rocks from Crete, Greece: Microprobe data and geochronological implications. *Lithos*, 95: 130–147.
- KROHE A. & WAWRZENITZ A.P. 2000 — Domainal variations of U-Pb monazite ages and Rb-Sr whole-rock dates in polymetamorphic paragneisses (KTB Drill Core, Germany): influence of strain and deformation mechanisms on isotope systems. *J. Metamorphic Geology*, 18: 271–291.
- KRYZA R. 2003 — Monazite as a geochronometer: useful, inexpensive — but not simple. *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 23: 15–17.
- KRYZA R., SVESHNIKOV K.I., CHARNLEY N., MONTEL J.M. 2004 — Monazite in Precambrian Granites of the Ukrainian Shield: Selected Aspects of Geochemistry and Chemical Age Dating. *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 24: 4.
- KUSIAK M.A., KĘDZIOR A., PASZKOWSKI M., SUZUKI K., GONZÁLEZ-ÁLVAREZ I., WAJSPRYCH B. & DOKTOR M. 2006a — Provenance Implications of Th-U-Pb Electron Microprobe Ages from Detrital Monazite in the Carboniferous Upper Silesia Coal Basin, Poland. *Lithos*, 88: 56–71.
- KUSIAK M., MICHALIK M. & PASZKOWSKI M. 2000 — Metoda CHIME (Chemical Th-U-total Pb isochron) — perspektywy rozwoju. *V Ogólnopolska Sesja Naukowa Datowanie Mineralów i Skał*, Kraków: 31–33.
- KUSIAK M. & PASZKOWSKI M. 2003 — Metoda chemiczna (CHIME) oznaczania wieku krystalizacji minerału monacytu — nowe użyteczne narzędzie w geologii. *PAN, Działalność Naukowa, wybrane zagadnienia*, z. 15: 135–138.
- KUSIAK M., PASZKOWSKI M. & DZIUBIŃSKA B. 2004 — The first precambrian detrital monazites from the Polish Extern Carpathian. (In:) *Applied Mineralogy*, ed. (Peccio et al.) Sao Paulo, ISBN 85-98656-01-1: 141–144.
- KUSIAK M., PASZKOWSKI M. & LEKKI J. 2003 — Monazite CHIME dating using electron- (EMPA) and proton- (PIXE) microprobes. *8th European Workshop on Modern Developments and Applications in Microbeam Analysis*, Cádiz: 309.
- KUSIAK M., PASZKOWSKI M.L., LEKKI J. & SUZUKI K. 2002 — Geochronology of monazites from Upper Silesia Coal Basin as a tool for provenance studies. *Documenta Geonica*: 151–156.

- KUSIAK M.A., SUZUKI K. & DUNKLEY D.J. 2006b — Effect of sulfur in monazite on electron microprobe age estimates. *Geological Society of America — Abstracts with Programs* 38 (7), #112170.
- KUSIAK M.A., SUZUKI K., DUNKLEY D.J., LEKKI J., BAKUN-CZUBAROW N. & PASZKOWSKI M. — EMP and PIXE dating of granulites from Gierałtów, Bohemian Massif, Poland. *Gondwana Research*; w druku.
- KUSIAK M., SUZUKI K. & M. PASZKOWSKI 2001 — Preliminary report of CHIME dating on detrital monazite grains from the Namurian Poruba Beds and the Stephanian Kwaczala Arkose in the Upper Silesia Coal Basin, Poland. *Journal of Earth and Planetary Science, Nagoya University*, 48: 15–41.
- LEKKI J., LEBED S., PASZKOWSKI M.L., KUSIAK M., VOGT J., HAJDUK R., POLAK W., POTEMPA A., STACHURA Z. & STYCZEŃ J. 2003 — Age determination of monazites using the new experimental chamber of the Cracow Proton Microprobe. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 210: 472–477.
- LISOWIEC N. 2006 — Precision estimation in electron microprobe monazite dating: Repeated measurements versus statistical (Poisson) based calculations. *Chemical Geology*, 234: 223–235.
- LUCAS A.S., HUGHES T.C., MCKENZIE C.D. 1981 — Proton microprobe dating of natural zircons. *Nuclear Instruments and Methods*, 191: 34–38.
- LUMPKIN G.R. & CHAKOUMAKOS B.C. 1988 — Chemistry and radiation effects of thorite-group minerals from the Harding pegmatite, Taos Country, New-Mexico. *American Mineralogist*, 73: 1405–1419.
- MAHAN K.H., WILLIAMS M.L., FLOWERS R.M., JERCINOVIC M.J., BALDWIN J.A. & BOWRING S.A. 2006 — Geochronological constraints on the Legs Lake shear zone with implications for regional exhumation of lower continental crust, western Churchill Province, Canadian Shield. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 223–242.
- MAJKA J. & BUDZYŃ B. 2006 — Monazite breakdown in metapelites from Wedel Jarlsberg Land, Svalbard — preliminary results. *Miner. Pol.*, 37, 1: 61–69.
- MANECKI M., MAJKA J., CZERNY J., WYPYCH A. 2006 — First monazite dates from the Elveflya Formation, Spitsbergen, preliminary results. *Miner. Pol. — Special Papers*, 29: 164–167.
- MAZZOLI C., HANCHAR J.M., DELLA MEA G., DONOVAN J.J. & STERN R.A. 2002 —  $\mu$ -PIXE analyses of monazite for total U-Th-Pb age determination. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 189: 394–399.
- MICHALIK M., BROSKA I., JACHER-ŚLIWCZYŃSKA K., KONECNY P. & HOLICKÝ J. 2004 — Dating of gneissic clasts from Gródek on the Jezioro Rożnowskie Lake (Silesian Unit). VIII Ogólnopolska Sesja Naukowa Datowanie Mineraleń i Skał: 101–106.
- MICHALIK M. & PASZKOWSKI M. 1997 — Datowanie minerałów w oparciu o analizy SEM-EDS (na przykładzie monacytów z granitoidów tatrzańskich). IV Ogólnopolska Sesja Naukowa: Datowanie Mineraleń i Skał: 56–69.
- MIKULSKI S., BAGIŃSKI B. & DZIERŻANOWSKI P. 2004 — The CHIME age calculation on monazite and xenotime in apl granite from the Szklarska Poreba Huta quarry. *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 24: 287–290.
- MONTEL J.-M. 1993 — A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas. *Chemical Geology*, 110: 127–146.
- MONTEL J.M., FORET S., VESCHAMBRE M., NICOLLET CH. & PROVOST A. 1996 — Electron microprobe dating of monazite. *Chemical Geology*, 131: 37–53.
- MOUGEOT R., RESPAUT J.P., LEDRU P. & MARIGNAC CH. 1997 — U-Pb chronology on accessory minerals of the Velay anatectic dome (French Massif Central). *European J. Mineralogy*, 9: 141–156.
- ONDREJKA M., UHER P., PRŠEK J. & OZDÍN D. — Arsenian monazite-(Ce) and xenotime-(Y), REE arsenates and carbonates from the Tisovec-Rejkovo rhyolite, Western Carpathians, Slovakia: Composition and substitutions in the (REE,Y)XO<sub>4</sub> system (X = P, As, Si, Nb, S). *Lithos*, 95: 116–129.
- OVERSTREET W.C. 1967 — The geologic occurrence of monazite. U.S. Geological Survey Professional Papers, 530: 1–327.
- PABST A. & HUTTON C.O. 1951 — Huttonite, a new thorium silicate. *American Mineralogist*, 36: 60–69.
- PARRISH R.R. 1990 — U-Pb dating of monazite and its application to geological problems. *Canadian J. Earth Science*, 27: 1431–1450.
- PARRISH R.R. & TIRREL R. 1989 — U-Pb age of the Baltaro granite, northwest Himalaya, and implications for monazite U-Pb systematics. *Geology*, 17: 1076–1079.
- PARSLOW G.R., BRANDSTATTER F., KURAT G. & THOMAS D.J. 1985 — Chemical ages and mobility of U and Th in anatectites of the Cree Lake Zone, Saskatchewan. *Canadian Mineralogist*, 23: 543–551.
- PASZKOWSKI M., KUSIAK M. & BANAŚ M. 1999 — Nowe, niekonwencjonalne metody w preparatyce minerałów akcesorycznych. *Documenta Geonica, The 4th Czech-Polish Conference about Carboniferous Sedimentology*. Peres Publ., Prague.
- POITRASSON F., HANCHAR J.M. & SCHALTEGGER U. 2002 — The current state and future of accessory mineral research. *Chemical Geology*, 191: 2–24.
- POPRAWA P., KUSIAK M.A., MALATA T., PASZKOWSKI M., PÉCSKAY Z. & SKULICH J. 2005 — Th-U-Pb chemical dating of monazite and K/Ar dating of mica combined: preliminary study of “exotic” crystalline clasts from the Western Outer Carpathian flysch (Poland). *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 25: 345–351.
- POPRAWA P., MALATA T., PÉCSKAY Z., BANAŚ M., SKULICH J., PASZKOWSKI M. & KUSIAK M. 2004 — Geochronology of crystalline basement of the Western outer Carpathians sediment source areas — preliminary data. *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 24: 329–332.
- POPRAWA P., MALATA T., PÉCSKAY Z., KUSIAK M.A., BANAŚ M. & PASZKOWSKI M. 2006 — Geochronology of the crystalline basement of the Western Outer Carpathians’ source areas — constraints from K/Ar dating of mica and Th-U-Pb chemical dating of monazite from the crystalline “exotic” pebbles. 7 GALTEC, 19–22.IV.2006, Zakopane, *Geolines*, 20: 110–112.
- PYLE J.M., SPEAR F.S., WARK D.A., DANIEL C.G. & STORM L.C. 2005 — Contributions to precision and accuracy of monazite microprobe ages. *American Mineralogist*, 90: 547–577.
- ROSE D. 1980 — Brabantite, CaTh(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> a new mineral of the monazite group. *Neues Jahrb. Mineralogie, Monatshefte*, 6: 247–257.
- SCHERRER N.C., ENGI, M., GNOS E., JAKOB V. & LIECHTI A., 2000 — Monazite analysis; from sample preparation to microprobe age dating and REE quantification. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 80: 93–105.
- SCOTT V.D., LOVE G. & REED S.J.B. 1995 — Quantitative Electron-Probe Microanalysis. Ellis Horwood Ltd, Chichester.
- SEYDOUX-GUILLAUME A.-M., GONCALVES P., WIRTH R. & DEUTSCH A. 2003 — Transmission electron microscope study of polyphase and discordant monazites: Site-specific specimen preparation using the focused ion beam technique. *Geology*, 31: 973–976.
- SEYDOUX-GUILLAUME A.-M., PAQUETTE J.-L., WIEDENBECK M., MONTEL J.-M. & HEINRICH W. 2002 — Experimental resetting of the U-Th-Pb systems in monazite. *Chemical Geology*, 191: 165–181.
- SIMPSON R.K., PARRISH R.R., SEARLE M.P. & WATERS D.J., 2000 — Two episodes of monazite crystallization during metamorphism and crustal melting in the Everest region of the Nepalese Himalaya. *Geology*, 28, 5: 403–406.
- SMITH H.A. & BARREIRO B. 1989 — Using monazite to date staurolite-grade metamorphism in a multiply metamorphosed region: West Central Maine. *Geological Society of America, Abstract Program*, 21 A: 285.
- SMITH H.A. & GILETTI B.J. 1997 — Lead diffusion in monazite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 1047–1055.
- STEIGER R.H. & JÄGER E. 1977 — Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 36: 359–362.
- SUN D. & SUZUKI K. 2004 — CHIME dating of granites exposed in the Huanggoushan area of the Jinlin province, China. *Bull. Nagoya Univ. Museum* 20: 15–23.
- SUZUKI K. 2005 — CHIME (Chemical Th-U-total Pb isochron method) dating on the basis of electron microprobe analysis. *J. Geol. Soc. Japan*, 111, 9: 509–526.
- SUZUKI K. & ADACHI M. 1991 — Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *Geochemical J.*, 25: 357–376.
- SUZUKI K. & ADACHI M. 1994 — Middle Precambrian detrital monazite and zircon the Hide gneiss on Oki-Dogo Island, Japan: their origin and implications for the correlation of basement gneiss of Southwest Japan and Korea. *Tectonophysics*, 235: 277–292.
- SUZUKI K., ADACHI M. & TANAKA T. 1991 — Middle Precambrian provenance of Jurassic sandstone in the Mino Terrane, central Japan: Th-U-total Pb evidence from an electron microprobe monazite study. *Sediment. Geol.*, 75: 141–147.
- WILLIAMS M.L. & JERCINOVIC M.J. 2002 — Microprobe monazite geochronology: putting absolute time into microstructural analyses. *J. Structural Geology*, 24: 1013–1028.
- WILLIAMS M.L., JERCINOVIC M.J., GONCALVES P. & MAHAN K. 2006 — Format and philosophy for collecting, compiling, and reporting microprobe monazite ages. *Chemical Geology*, 225: 1–15.
- WILLIAMS M.L., JERCINOVIC M.J. & HETHERINGTON C.L. — Microprobe Monazite Geochronology: Understanding Geologic Processes by Integrating Composition and Chronology. *An. Rev. Earth and Planetary Sciences*, 35: 137–175.
- WILLIAMS M.L., JERCINOVIC M.J. & TERRY M.P. 1999 — Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe: Deconvoluting multistage tectonic histories. *Geology*, 27: 1023–1026.
- WING B., FERRY J.M. & HARRISON T.M. 2003 — Prograde destruction and formation of monazite and allanite during contact and regional metamorphism of pelites: petrology and geochronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 228–250.

Praca wpłynęła do redakcji 25.10.2006 r.  
 Akceptowano do druku 23.01.2007 r.