

Jan SZEWCZYK

## Otworowe badania spektrometryczne mineralizacji torowej w Sudetach

Przedstawiono wyniki zastosowań otworowych pomiarów spektrometrycznych naturalnego promieniowania gamma w badaniach mineralizacji torowej na obszarze metamorfiku izerskiego (Sudety Zachodnie). Rezultaty mają zarówno charakter metodyczny, gdyż dotyczą zagadnień pomiarowo-interpretacyjnych, jak również dokumentacyjny, ponieważ związane są rozpoznaniem mineralizacji torowej. Przeważają one pod wieloma względami wyniki laboratoryjnych oznaczeń tego pierwiastka. Badania radiometryczne, nie tylko otworowe, wskazują na kontynuację strefy zmineralizowanej poza obszar objęty dotychczasowym szczegółowym rozpoznaniem wiertniczym, a ponadto nie wykluczają możliwości występowania w głębszych strefach omawianego obszaru innych nie rozpoznanych dotychczas stref zmineralizowanych.

### WSTĘP

Emisja promieniowania jądrowego, charakterystyczna dla pierwiastków promieniotwórczych, jest od dawna szeroko wykorzystywana w geofizycznych metodach prospekcji złóż tych pierwiastków. Pomiar promieniowania gamma, wykonywane na powierzchni badanych skał czy też w otworach wiertniczych, są efektywną i szeroko stosowaną metodą poszukiwania i rozpoznawania takich złóż. W tym celu od kilku lat coraz powszechniej stosowany jest spektrometryczny wariant pomiarów gamma, dający możliwość selektywnego określenia charakteru źródeł promieniowania, a w sprzyjających okolicznościach – koncentracji Th, U oraz K w badanych skałach (J. Szewczyk, 1984).

W latach 70-tych z inicjatywy autora w Międzyresortowym Instytucie Fizyki i Techniki Jądrowej AGH w Krakowie skonstruowano czterokanałowy otworowy spektrometr gamma (K. Pałka, 1983). Doskonałą okazją do praktycznego i to od razu szerokiego zastosowania tej nowej metody badawczej było podjęcie przez Instytut Geologiczny w drugiej połowie lat 70-tych poszukiwań złóż toru i pierwiastków ziem rzadkich w Sudetach, w ramach czego przewidywano m.in. wykonanie kilkuset płytkich (do 30 m) otworów wiertniczych.

Obszar badań leży w zachodniej części metamorfiku izerskiego, w obrębie elewacyjnego elementu podłoża krystalicznego. Poczynając od wczesnych lat

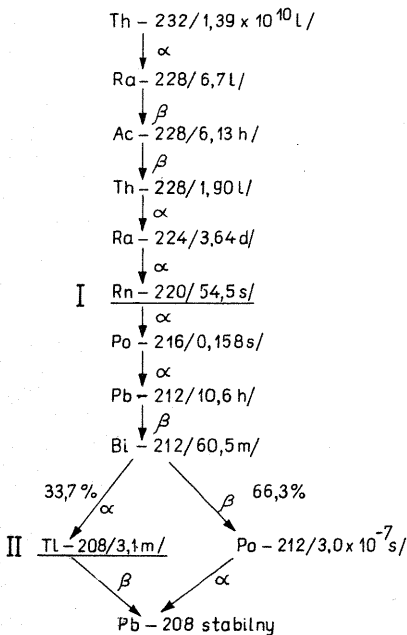


Fig. 1. Izotopy rodziny promieniotwórczej Th-232 wraz z typem oraz półokresem rozpadu

Isotopes of the thorium Th-232 decay series, types of decay and half-life values

I - pomiary emanacyjne; II - pomiary spektrometryczne;  
 l - lata; d - doby; h - godziny; m - minuty; s - sekundy  
 I - emanometry; II - spectrometry; l - years; d - days;  
 h - hours; m - minutes; s - seconds

50-tych prowadzono tu liczne badania poszukiwawcze zarówno powierzchniowe, jak i wiertnicze. Mimo wykonania tych prac, złożoność budowy geologicznej, w tym również przestrzennego rozkładu mineralizacji torowej, nie pozwalała na ostateczne określenie perspektyw złożowych. W drugiej połowie lat 70-tych Instytut Geologiczny podjął kolejny etap badań, zakładający m.in. wykonanie – poza wspomnianymi otworami wiertniczymi – obszernego programu geofizycznych badań powierzchniowych oraz otworowych (J. Mikuszewski i in., 1976). W ramach tych prac zrealizowano, omawiane w niniejszym artykule, otworowe badania spektrometryczne naturalnego promieniowania gamma.

### Th-232 ORAZ PRODUKTY JEGO ROZPADU W ŚRODOWISKU GEOLOGICZNYM

Th-232 jest izotopem macierzystym naturalnych izotopów promieniotwórczych tworzących, w liczbie 12, rodzinę torową zakończoną stabilnym izotopem Pb-208. Na fig. 1 przedstawiono wszystkie izotopy tej rodziny wraz z informacją o typie oraz półokresem rozpadu. Izotopy rodziny promieniotwórczej Th-232 są w wyniku zachodzących rozpadów α i β źródłem promieniowania gamma. Ogółem znanych jest ponad 45 linii energetycznych tego promieniowania o energiach od kilkudziesięciu keV do 2,62 MeV (J.A. Adams, P. Gasparini, 1970). Około 85% energii promieniowania gamma wiąże się z izotopem Tl-208, natomiast z linią energetyczną 2,62 MeV tego izotopu – około 8% wszystkich kwantów gamma emitowanych przez całą rodzinę promieniotwórczą, stanowiąc przy tym około 46% całej energii tego promieniowania. Ze względu na bardzo korzystną charakterystykę tej linii w odniesieniu zarówno do linii energetycznych izotopów rodziny U-238, jak i do izotopu K-40, jest ona doskonałym źródłem informacji o Tl-208. W przypadku równowagi promieniotwórczej między tym izotopem a Th-232 istnieje możliwość

ilościowego określania koncentracji toru w badanych skałach. Stanowi to podstawę spektrometrycznej metody oznaczania tego pierwiastka w utworach geologicznych.

Stosunkowo krótkie półokresy rozpadu wszystkich produktów rozpadu Th-232 (fig. 1) pozwalają na względnie szybkie, bo już praktycznie po około 70 latach, osiągnięcie równowagi promieniotwórczej w całym szeregu. Efektywny półokres rozpadu wynosi bowiem dla rodziny Th-232 zaledwie około 8 lat, podczas gdy np. dla produktów rozpadu rodziny U-238 – 330 tys. lat (IAEA, 1979).

Th występuje w przyrodzie wyłącznie w związkach czterowartościowych, nie ulegających rozpuszczeniu w wodzie. Transport odbywa się jedynie w sposób mechaniczny (L.W. Gorbuzina i in., 1970). Czas trwania procesów geologicznych, mogących wpływać na rozproszenie poszczególnych izotopów tworzących rodzinę Th-232, jest na ogół wielokrotnie większy od czasu ustalania się warunków równowagi promieniotwórczej. Migracja toronu (Rn-220), będącego gazem szlachetnym, praktycznie nie wpływa na zaburzenia stanu równowagi (J. Szewczyk, 1981). Środowisko geologiczne, być może z wyłączeniem kilkucentymetrowej strefy przypowierzchniowej, tworzy więc układ geochemicznie zamknięty. Pomiar aktywności toronu, realizowany metodą emanacyjną (fig. 1), oraz pomiar promieniotwórczości gamma izotopu Tl-208, dokonywany metodą spektrometryczną, z prospekcyjnego punktu widzenia dostarczają zatem równoważnych informacji o koncentracji toru w badanych skałach.

## BUDOWA GEOLOGICZNA OBSZARU BADAŃ

Obszar badań położony jest w zachodniej części metamorfiku izerskiego, w obrębie elewacyjnego elementu podłoża krystalicznego utworzonego przez różne typy granitów, granitognejsów, gnejsów, leukognejsów, noszących znamiona kataklyz. Wiek tych skał oceniany jest na prekambryjski. Istniejący tu system bloków tektonicznych jest rezultatem orogenezy alpejskiej. Strefy obniżone wypełnione są osadami trzeciorzędowymi (fig. 2). Wzdłuż stref rozłamów w podłożu krystalicznym (J. Mikuszewski i in., 1976) zachodziła erupcja trzeciorzędowych law bazaltowych i fonolitowych.

W wyniku powierzchniowego rozpoznania radiometrycznego prowadzonego w latach 50-tych i 60-tych, na które składało się zarówno zdjęcie emanacyjne, jak i radiometryczne (pomiar całkowitej aktywności gamma), wykryto szereg stref anomalnych, z których najbardziej interesująca jest anomalia w północno-wschodniej części obszaru badań (fig. 3). W południowo-zachodnim fragmencie anomalii, uznawanym wówczas na najciekawszy, wykonano szereg otworów wiertniczych oraz rowów poszukiwawczych stwierdzając występowanie hydrotermalnej mineralizacji torowej. Mineralizacja torem i pierwiastkami ziem rzadkich wiązana jest z trzeciorzędowym magmatyzmem alkalicznym. Minerale toru występują w formie żyłek oraz gniazd w obrębie zmetasomatygowanych skał magmowo-metamorficznych. Charakterystyczną cechą omawianej mineralizacji jest m.in. współwystępowanie ze skałami typu episyenitów.

W ramach prac poszukiwawczych, prowadzonych w latach 70-tych, których integralną część stanowiły omawiane w niniejszym artykule badania spektrometryczne, dla dokładniejszego określenia perspektyw złożowych tej strefy wykonano dodatkowo m.in. ponad 40 płytkich otworów wiertniczych, w tym kilka do głębokości 300 m. Lokalizację tych prac wraz z wynikami powierzchniowych zdjęć radiometrycznych przedstawiono na fig. 2. We wszystkich otworach wiertniczych wykonano spektrometryczne badania naturalnego promieniowania gamma.

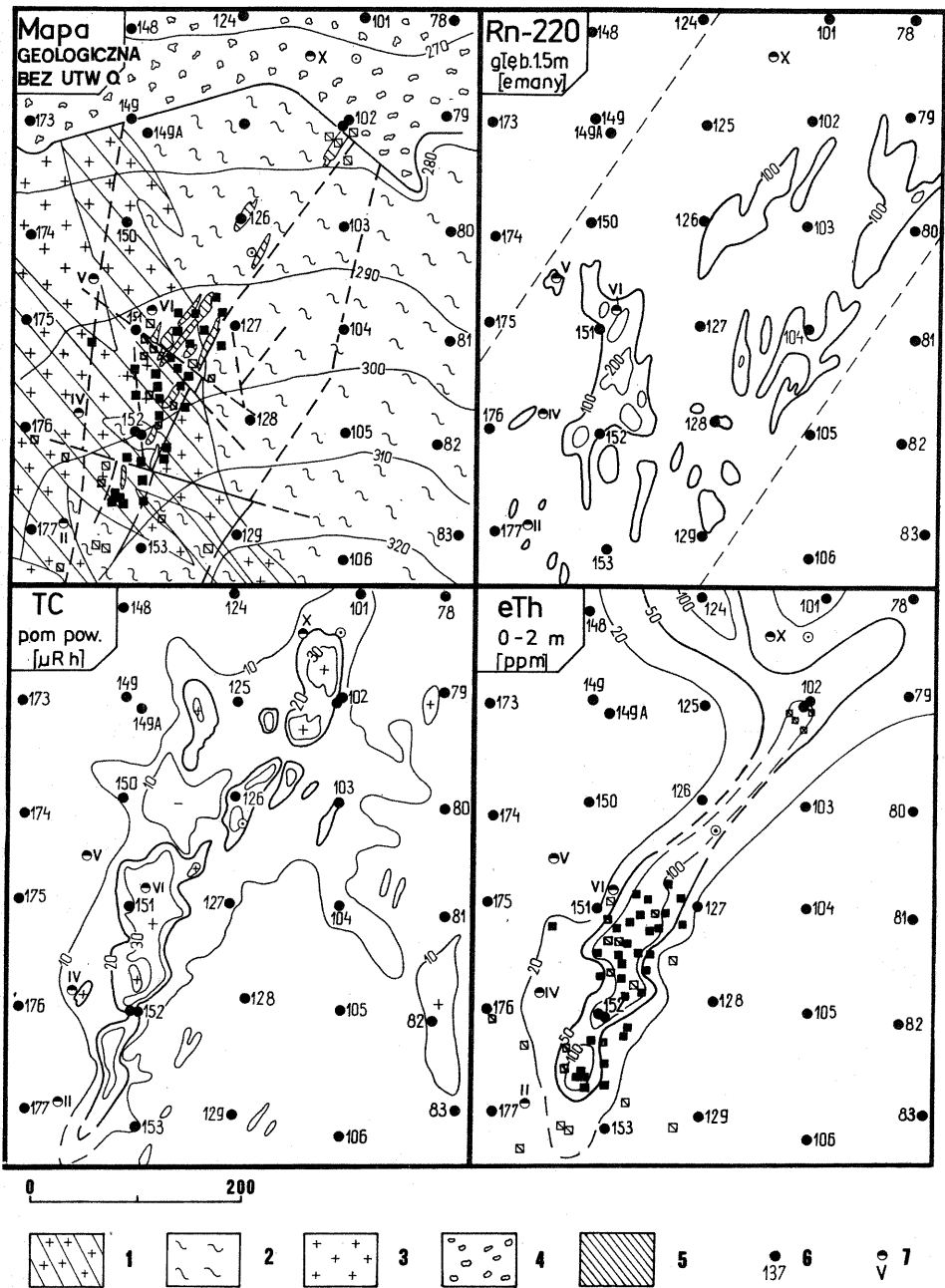
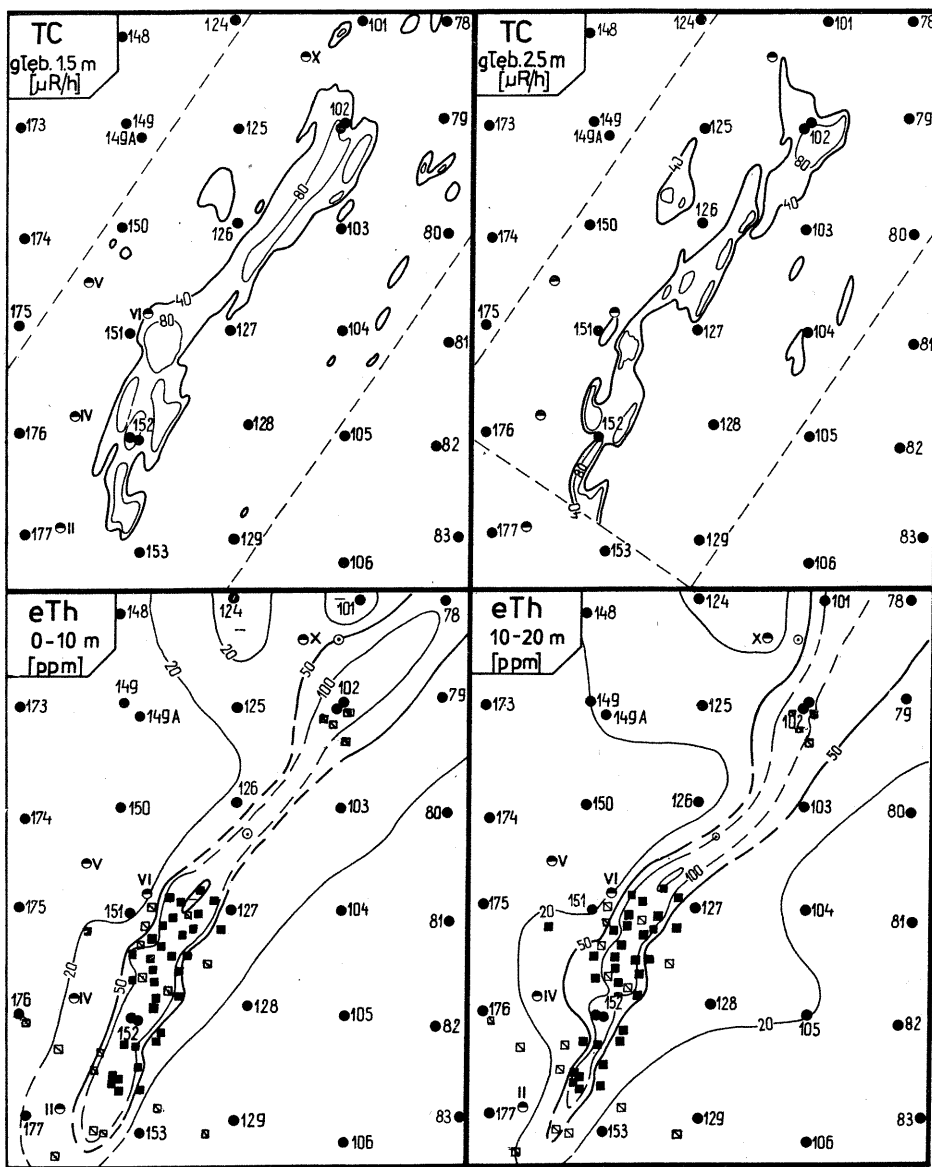


Fig. 2. Wyniki powierzchniowego oraz wglębnego rozpoznania radiometrycznego strefy zmineralizowanej wraz z fragmentem odkrytej mapy geologicznej

1 – granitognejsy; 2 – gnejsy; 3 – granity; 4 – brekcja tektoniczna; 5 – episyenity; 6 – otwory wiertnicze do 30 m (w siatce  $100 \times 100$  m); 7 – otwory wiertnicze skośne do 150 lub 300 m; 8 – otwory wiertnicze do 30 m (w siatce  $20 \times 20$  m); 9 – archiwalne otwory wiertnicze; 10 – archiwalne otwory wiertnicze bez pomiarów radiometrycznych; 11 – obszar badań radiometrycznych; 12 – dyslokacje stwierdzone; 13 – dyslokacje przypuszczalne



■ 8   □ 9   ○ 10   - - - 11   ——— 12   - - - 13

Results of surface and borehole radiometric surveys of the zone of mineralization and a part of geological map

1 – granitogneisses; 2 – gneisses; 3 – granites; 4 – tectonic breccia; 5 – episyenites; 6 – boreholes 30 m deep (in 100×100 m grid); 7 – deviated boreholes 150 to 300 m deep; 8 – boreholes up to 30 m deep (in 20×20 m grid); 9 – old boreholes; 10 – old boreholes without radiometric logging; 11 – area covered by radiometric surveys; 12 – controlled faults; 13 – inferred faults

Ze względu na cel realizowanych prac oraz znaczne zaburzenia stanu równowagi promieniotwórczej w szeregu U-238, których można było się spodziewać w badanych utworach, porównania takiego dokonano wyłącznie w odniesieniu do oznaczeń Th. W prowadzeniu tych rozważań niezbędne są informacje zarówno o sposobie pobierania próbek do badań, jak i o dokładnościach stosowanych metod analitycznych.

#### DOKŁADNOŚĆ LABORATORYJNYCH OZNACZEŃ Th

W badaniach laboratoryjnych dla większości próbek stosowano metodę fluorescencji rentgenowskiej (M. Stępniewski, I. Iwasińska, 1981), a jedynie w nielicznych przypadkach (próbki o bardzo wysokich zawartościach Th) metodę spektrofotometryczną z wykorzystaniem barwnych kompleksów Th – toron. Dolny próg oznaczalności dla pierwszej metody określono początkowo na 10 ppm, przy zakresie koncentracji 10–1000 ppm i przy średnim błędzie względnym  $\pm 25\%$  (w obszarze niskich koncentracji  $\pm 40\%$ ). Dla drugiej metody dolny próg oznaczalności określono na 100 ppm, natomiast zakres stosowania na 100–20 000 ppm Th przy błędzie względnym  $\pm 30\%$ . W okresie późniejszym, po weryfikacji wyników kalibracji układu pomiarowego stosowanego w pierwszej metodzie badawczej, dolny próg oznaczalności Th określono na 20 ppm Th (I. Iwasińska, inf. ustna). Na fig. 4 przedstawiono wyniki kalibracji aparatury rentgeno fluorescencyjnej firmy *Rigaku Corporation*, którą wykonywano badania laboratoryjne. Kalibrację prowadzono na podstawie pomiarów natężenia promieniowania linii emisyjnych związanych z Th dla międzynarodowych wzorców skał i minerałów, oznaczonych na fig. 4 liczbami 1–12.

Odcinkami pionowymi oznaczono zakresy zawartości Th w zhomogenizowanych próbkach wzorcowych, uzyskanych w wyniku badań wykonanych w różnych laboratoriach światowych (M. Stępniewski, I. Iwasińska, 1981), punktami zaś wyniki dla próbek badanych jedynie w pojedynczych laboratoriach. Należy podkreślić, że przedstawione na fig. 4 oznaczenia Th są wykonane różnymi technikami analitycznymi w różnych laboratoriach. Wyniki te są szczególnie rozbieżne w zakresie niskich koncentracji Th. W przypadku metody fluorescencji rentgenowskiej podstawowym źródłem błędów są efekty związane zarówno z matrycą skalną, jak i koincydencją różnych linii analitycznych.

Na podstawie porównawczych badań analitycznych dwóch starannie zhomogenizowanych próbek technologicznych pobranych ze strefy zmineralizowanej (badań,

Tabela 1

Badania porównawcze składu chemicznego

Składnik	Próbka 1 (% wag.)			Próbka 2 (% wag.)		
	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3
Th	0,68	1,13	0,79	0,24	0,27	0,22
U	0,077	0,090	0,042	0,0027	0,0045	0,0083
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	0,083*	0,010**	0,105	0,034*	0,045**
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,00	3,00	2,50	2,36	1,97	2,25

\* tylko La; \*\* Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

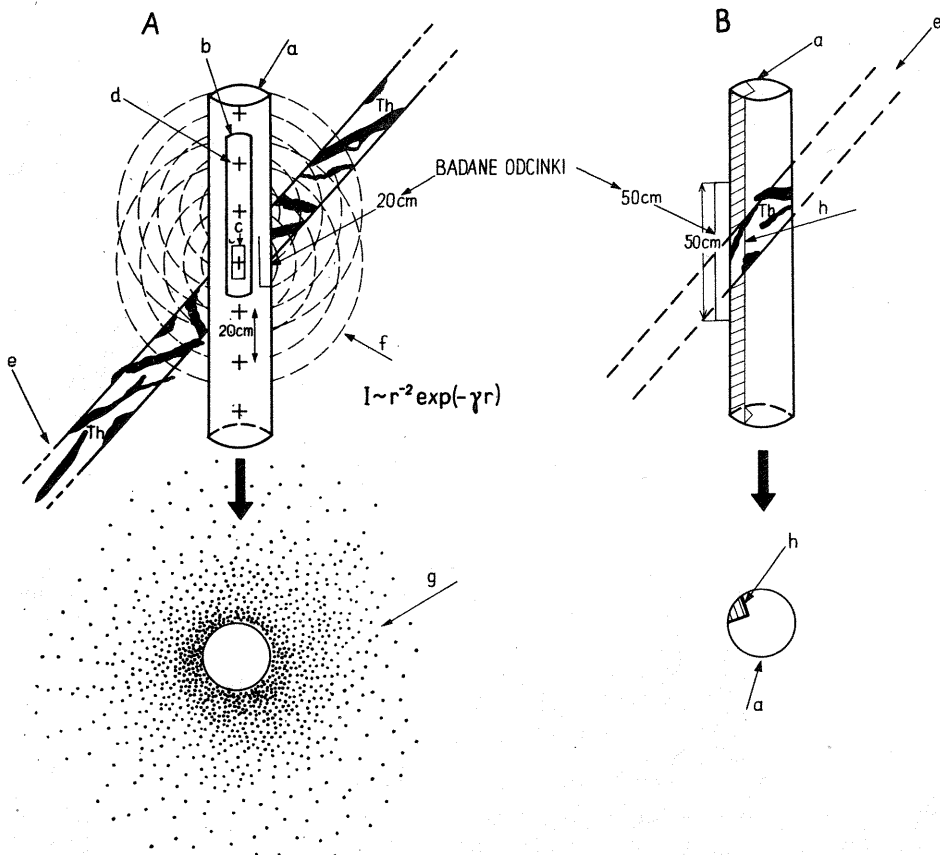


Fig. 5. Schematyczne porównanie reprezentatywności wyników metody otworowych spektrometrycznych określeń zawartości toru (A) z wynikami badań analitycznych rdzeni wiertniczych (B)  
Comparison of representativeness of results of spectrometric measurements of concentration of thorium (A) and laboratory measurements of thorium in core material (B)

a – otwór wiertniczy; b – sonda radiometryczna; c – detektor; d – kolejne położenie detektora; e – mineralizacja Th; f – izolinie jednakowego średniego zasięgu promieniowania gamma; g – schematyczny rozkład przestrzenny atomów – emiterów promieniowania gamma (Tl-208); h – opróbowany fragment rdzenia z mineralizacją Th; waga każdorazowo badanego fragmentu górotworu ~ 250–300 kg; waga pojedynczej próbki fragmentu rdzenia wiertniczego ~ 0,5 kg; waga próbki podlegającej bezpośrednio badaniom laboratoryjnym ~ 10 dag

a – borehole; b – radiometric tool; c – detector; d – successive positions of detector; e – Th mineralization; f – isolines of normalized mean values of gamma radiation; g – simplified spatial distribution of atoms – emitters of gamma radiation (Tl-208); h – tested core fragments with Th mineralization; weight of studied rock fragments – c. 250 to 300 kg; weight of studied core fragments – c. 0.5 kg, weight of samples covered by direct laboratory tests – c. 0.1 kg

co należy podkreślić, wykonanych niezależnie przez trzy różne laboratoria), okazało się, że również w zakresie wysokich koncentracji Th obserwuje się znaczne rozbieżności wyników. Wyniki tych badań dotyczące Th, U,  $TR_2O_3$  (sumy pierwiastków ziem rzadkich) oraz  $Fe_2O_3$  przedstawiono w tab. 1. Należy podkreślić, że badania te zostały wykonane różnymi technikami analitycznymi oraz zarówno sposób pobrania próbek, jak i sposób ich homogenizacji, nie miały wpływu na ostateczny wynik analizy.

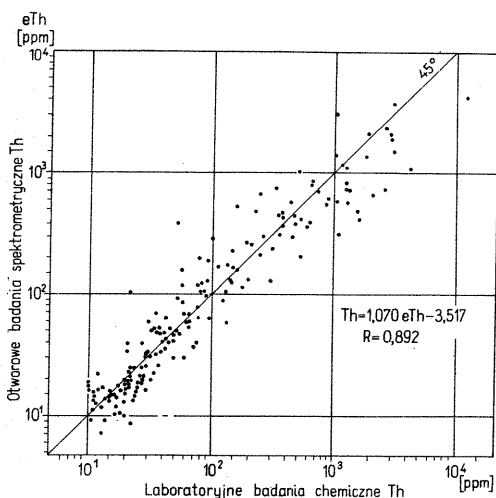


Fig. 6. Porównanie wyników otworowych badań spektrometrycznych ( $eTh$ ) z wynikami laboratoryjnych badań chemicznych Th opartych na opróbowaniu rdzeni wiertniczych

Comparison of determinations of Th by spectrometric borehole surveys ( $eTh$ ) and chemical laboratory tests

Z przedstawionych danych wynika, że laboratoryjne oznaczenie Th, szczególnie w przypadku równoczesnego występowania pierwiastków ziem rzadkich, stanowi trudny problem analityczny.

#### PORÓWNANIE LABORATORYJNYCH OZNACZEŃ ANALITYCZNYCH Th Z WYNIKAMI SPEKTROMETRYCZNYCH BADAŃ OTWOROWYCH

Dokonyjąc porównania wyników laboratoryjnych badań rdzeni z wynikami badań geofizycznych wykonywanych w otworach wiertniczych należy w pełni uświadomić sobie charakter tego porównania. Z jednej strony mamy bowiem do czynienia z badaniami bardzo niewielkiego fragmentu rdzenia wiertniczego, z drugiej natomiast – z badaniami nieporównywalnie większego fragmentu strefy przyotworowej. Sytuacja ta jest w sposób schematyczny przedstawiona na fig. 5. W przypadku niejednorodnego rozkładu przestrzennego badanego składnika, a niewątpliwie z tym mamy do czynienia w rozważanym przypadku, reprezentatywność badanych obiektów ma bardzo duży wpływ na wiarygodność prognostyczną informacji ilościowych. Również sam sposób pobierania próbek do badań analitycznych ma istotny wpływ na wynik zawartości badanego pierwiastka, w tym przypadku Th. Z czynnikiem tym, a nie z samym laboratoryjnym pomiarem instrumentalnym, może być związane najpoważniejsze źródło błędów. W omawianych badaniach praktycznie stosowano opróbowanie punktowe.

Na fig. 6 przedstawiono porównanie wyników koncentracji Th, oznaczonej metodą fluorescencji rentgenowskiej, z wynikami otworowych spektrometrycznych określeń  $eTh$ <sup>1</sup>. Poszczególne punkty reprezentują odcinki profilu dające się w obydwu metodach badawczych wyróżnić i wzajemnie jednoznacznie przyporządkować. Między rozważanymi zbiorami danych istnieje liniowy związek korelacyjny charakteryzujący się względnie wysokim współczynnikiem korelacji  $R = 0,892$ . Z uwagi na charakter obydwu zbiorów jest to typowy dwuwymiarowy rozkład statystyczny.

<sup>1</sup> Przedrostek  $e$  oznacza ekwiwalentną koncentrację pierwiastka promieniotwórczego, określoną na podstawie ilości produktów jego rozpadu pozostających w stanie równowagi promieniotwórczej z izotopem macierzystym.



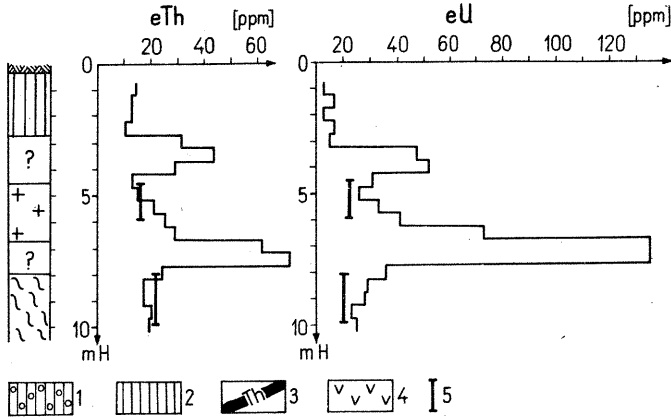


Fig. 7. Przykład wpływu niepełnego uzysku rdzenia na informacje o zawartościach Th oraz U określonych metodą analityczną

Influence of incomplete core retrieval on reliability of U and Th determinations by analytical method  
 1 – glina zwalowa; 2 – glina deluwialna; 3 – mineralizacja torowa; 4 – trachity; 5 – wyniki badań laboratoryjnych Th i U; pozostałe objaśnienia jak na fig. 2; otwór wiertniczy zlokalizowany w strefie powierzchniowej anomalii radonowej; dla porównania przedstawiono wyniki otworowych spektrometrycznych określeń zawartości  $eTh$  i  $eU$   
 1 – till; 2 – deluvial loam; 3 – Th mineralization; 4 – trachytes; 5 – results of laboratory determinations of Th and U concentrations; other explanations as given in Fig. 2; borehole situated in the zone of surface radon anomaly; results of spectrometric borehole surveys of  $eTh$  and  $eU$  concentrations given for comparison

Każdy zbiór w sposób przybliżony opisuje rozkład Th w badanym górotworze. Żadna z tych informacji nie jest „dokładnym” opisem rzeczywistego rozkładu, lecz jedynie jej przybliżeniem. Zbieżność wyników obydwu metod wskazuje z dużym prawdopodobieństwem, że są one pozbawione błędów systematycznego. Stosunkowo duży rozrzut punktów wokół prostej regresji ma źródło zarówno w błędach instrumentalnych obydwu metod, jak i we wspomnianych wcześniej czynnikach przyrodniczych. Dokładne wyjaśnienie udziału każdego z nich w obserwowanym obrazie wykracza poza ramy tego opracowania.

Ważnym wnioskiem, który wynika z omawianego porównania, jest generalne potwierdzenie równowagi promieniotwórczej w szeregu Th-232. Występujące, być może, lokalne zaburzenia tego stanu mogą mieć również pewien udział w obserwowanym na fig. 6, rozrzucie punktów doświadczalnych.

Szybkość i łatwość realizacji otworowych pomiarów spektrometrycznych w odniesieniu do całego profilu, niskie koszty, a przede wszystkim wysoka reprezentatywność wyników stały się przyczyną wykonania badań we wszystkich, tj. w ponad 700 otworach wiertniczych zrealizowanych w ramach prac poszukiwawczych. Zdarzające się często ubytki rdzenia, a przede wszystkim ograniczona liczba możliwych praktycznie do wykonania analiz laboratoryjnych, spowodowały, że wyniki badań były w wielu przypadkach jedyną kompletną informacją o zawartości Th i U.

## WYNIKI BADAŃ

Na fig. 7 przedstawiono przykład wyników otworowych pomiarów spektrometrycznych wykonanych w strefie anomalii radonowej stwierdzonej wcześniej powierzchniami badaniami emanacyjnymi. Wyniki badań laboratoryjnych

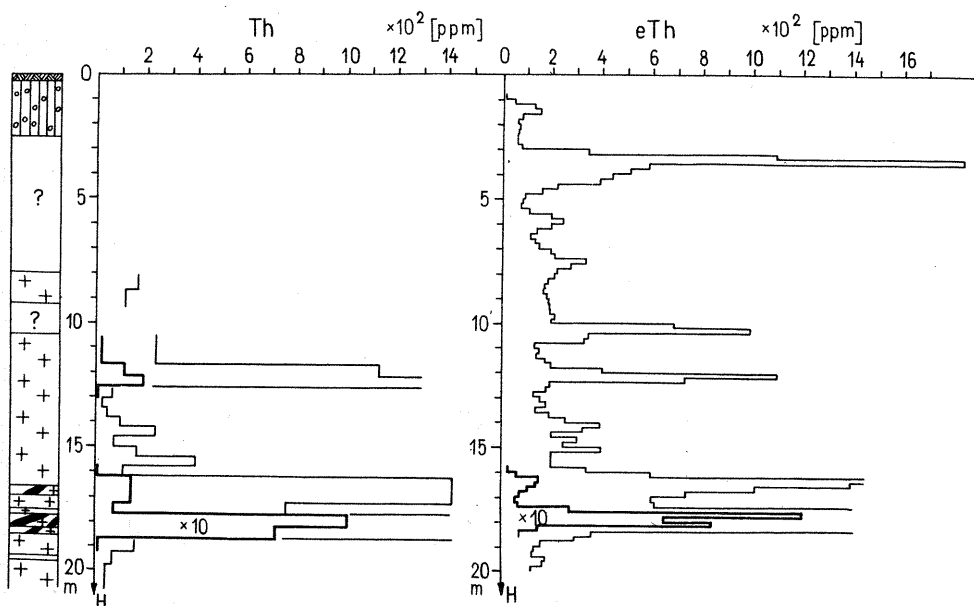


Fig. 8. Porównanie laboratoryjnych analitycznych określeń Th z wynikami otworowych spektrometrycznych określeń eTh w otworze z niepełnym uzyskiem rdzenia

Comparisons of laboratory determinations of Th concentrations and spectrometric borehole measurements of eTh concentrations for a borehole with incomplete core retrieval

Objaśnienia jak na fig. 2 i 7

Explanations as given in Figs. 2 and 7

niekompletnego w tym przypadku rdzenia nie ujawniły podwyższonych zawartości radonu (Rn-222), natomiast otworowe badania spektrometryczne potwierdziły je w pełni. Ogółem, badania spektrometryczne wykonano w ponad 23 000 punktach.

Na fig. 8–10 przedstawiono przykłady porównania wyników otworowych spektrometrycznych oznaczeń Th z wynikami analitycznych badań rdzeni. Ciągłe informacje o głębokościowym rozkładzie koncentracji Th w poszczególnych otworach, przy stosunkowo gęstej siatce wierceń ( $100 \times 100$  m), stwarzały m.in. możliwość określenia przestrzennego rozkładu Th w całym badanym obszarze. Na fig. 3 przedstawiono jako przykład mapę rozkładu Th dla strefy głębokościowej 0–10 m (miąższość nadkładu osadowo-deluwialnego wynosiła średnio około 3 m). Na mapie tej w NW i NE części obszaru badań można wyróżnić generalnie dwie grupy anomalii. Pierwsza związana jest z występowaniem trachitów alkalicznych, druga natomiast – z hydrotermalną mineralizacją torową. Warto zwrócić uwagę, że w obszarach znajdujących się poza strefami anomalnymi koncentracje Th są zbliżone lub nawet niższe od dolnej granicy oznaczalności tego pierwiastka dla stosowanych laboratoryjnych metod analitycznych.

Przedstawiony tu jako przykład sposób prezentowania wyników badań spektrometrycznych ma charakter formalny, nie uwzględniający budowy geologicznej obszaru badań. Jest on jednym z wielu możliwych sposobów wykorzystania omawianych wyników. Na fig. 11 zestawiono wyniki powierzchniowych pomiarów spektrometrycznych z przekrojem geologicznym A–B zlokalizowanym w NW części obszaru (fig. 3). Między wynikami spektrometrycznych pomiarów powierzch-

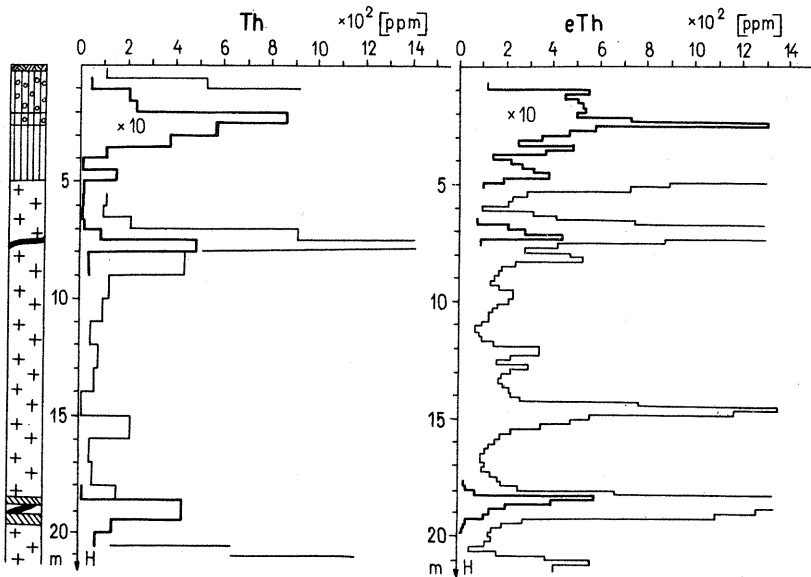


Fig. 9. Przykład porównania wyników laboratoryjnych analitycznych określeń Th z wynikami otworowych spektrometrycznych określeń eTh w otworze z pełnym uzyskiem rdzenia

Comparison of results of laboratory analytical measurements of Th and spectrometric borehole measurements of eTh for a fully cored borehole

Objaśnienia jak na fig. 2 i 7

Explanations as given in Figs. 2 and 7

niowych oraz otworowych występuje zgodność jakościowa. Koncentracje Th w utworach przypowierzchniowych są jednak wyraźnie niższe w stosunku do koncentracji w utworach głębiej zalegających. Można to wiązać z ucieczką Rn-220 (toronu) z utworów przypowierzchniowych, powodującą zaburzenia stanu równowagi promieniotwórczej między Th-232 a Tl-208.

Strefa mineralizacji torowej (fig. 3) została objęta m.in. szczegółowym rozpoznaniem wiertniczym oraz badaniami radiometrycznymi (fig. 2). Jak już wspomniano, w SW części tej strefy już w latach 60-tych prowadzono szczegółowe badania, w skład których poza pracami wiertniczymi wchodziły zarówno sondowania gamma, jak i zdjęcie emanacyjne. W latach 70-tych przeprowadzono także kilkakrotnie powierzchniowe pomiary radiometryczne w zróżnicowanej siatce pomiarowej przy zmiennych azymutach linii profilowych. Badania te wykonano niestety niekalibrowanymi sondami radiometrycznymi. Dzięki metodzie unifikacji pomiarów opracowano mapę kompilacyjną całości powierzchniowych pomiarów naturalnego promieniowania gamma (J. Szewczyk, 1981) – fig. 2.

Otworowe pomiary spektrometryczne umożliwiły m.in. określenie przestrzennego rozkładu koncentracji toru w różnych strefach głębokościowych. Na fig. 2 przedstawiono wyniki wymienionych badań łącznie z fragmentem odkrytej mapy geologicznej, autorstwa M. Jęczmyk, oraz lokalizacją wszystkich prac wiertniczych wykonanych na tym obszarze. Jak łatwo zauważyć, wyniki zdjęcia emanacyjnego bardzo wyraźnie odbiegają od wyników pozostałych metod radiometrycznych dotyczących zarówno rozpoznania wgłębnego, jak i powierzchniowego. Szczególnie istotne są tutaj rozbieżności wyników wspomnianego zdjęcia w stosunku do

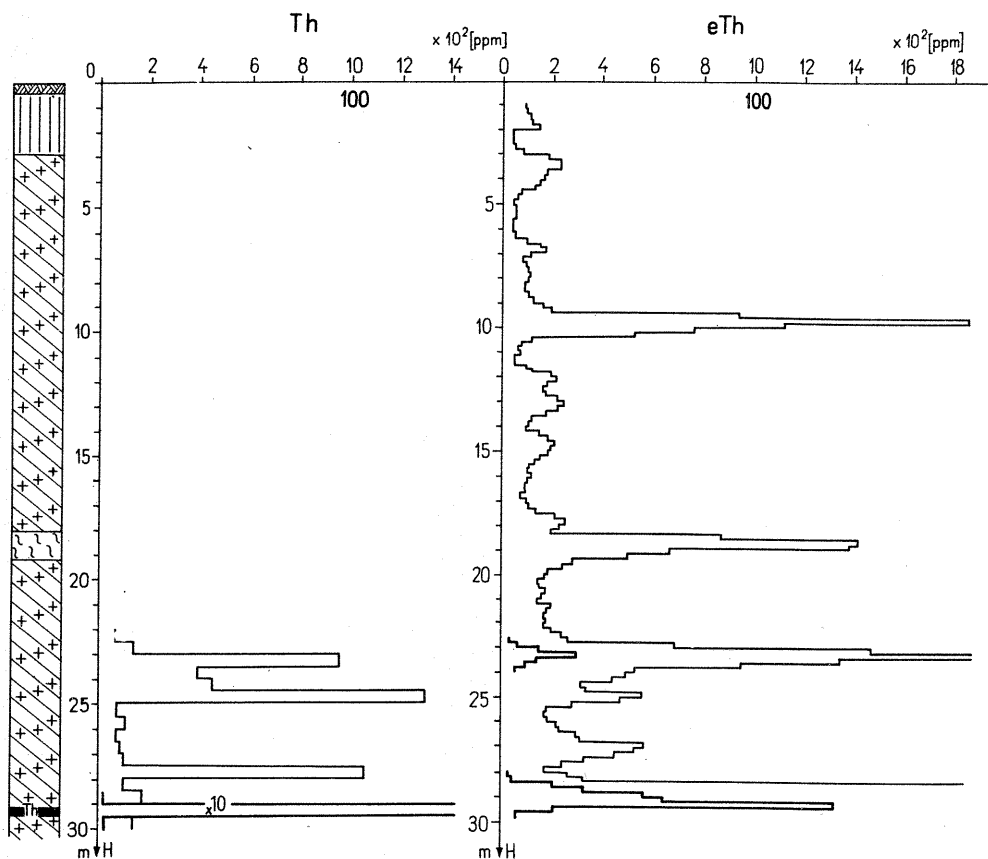


Fig. 10. Wyniki spektrometrycznych badań w otworze częściowo opróbowanym  
Results of spectrometric surveys for a partly cored borehole

Objaśnienia jak na fig. 2 i 7

Explanations as given in Figs. 2 and 7

wyników sondowań gamma. Należy zaznaczyć, że pomiary emanacyjne i sondowania gamma prowadzone były w siatce  $20 \times 5$  m, w tych samych punktach pomiarowych, w tym samym czasie i przez tego samego wykonawcę. Stwierdzony w strefie zmineralizowanej na podstawie otworowych pomiarów spektrometrycznych praktycznie jednoskładnikowy charakter emiterów promieniowania gamma, związanych z Tl-208, pozwala przyjąć, że obydwie typy pomiarów, tj. pomiar aktywności alfa izotopu Rn-220 oraz pomiar sumarycznej aktywności gamma powinny mieć w tym przypadku równoważny charakter. Wyniki powierzchniowych pomiarów sumarycznego promieniowania gamma, przedstawione na mapie kompilacyjnej, wykazują generalną zgodność z wynikami sondowań gamma. Obserwowane tu jest jednocześnie niewielkie przesunięcie osi strefy anomalnej w kierunku NW, związane z grawitacyjnym wpływem zwietrzliny utworów podłoża, zgodnym z morfologią terenu (fig. 2). Również wyniki otworowych pomiarów spektrometrycznych, mimo braku wystarczającego rozpoznania wiertniczego w NE części strefy anomalnej, generalnie potwierdzają jej obraz zarysowany wynikami sondowań gamma.

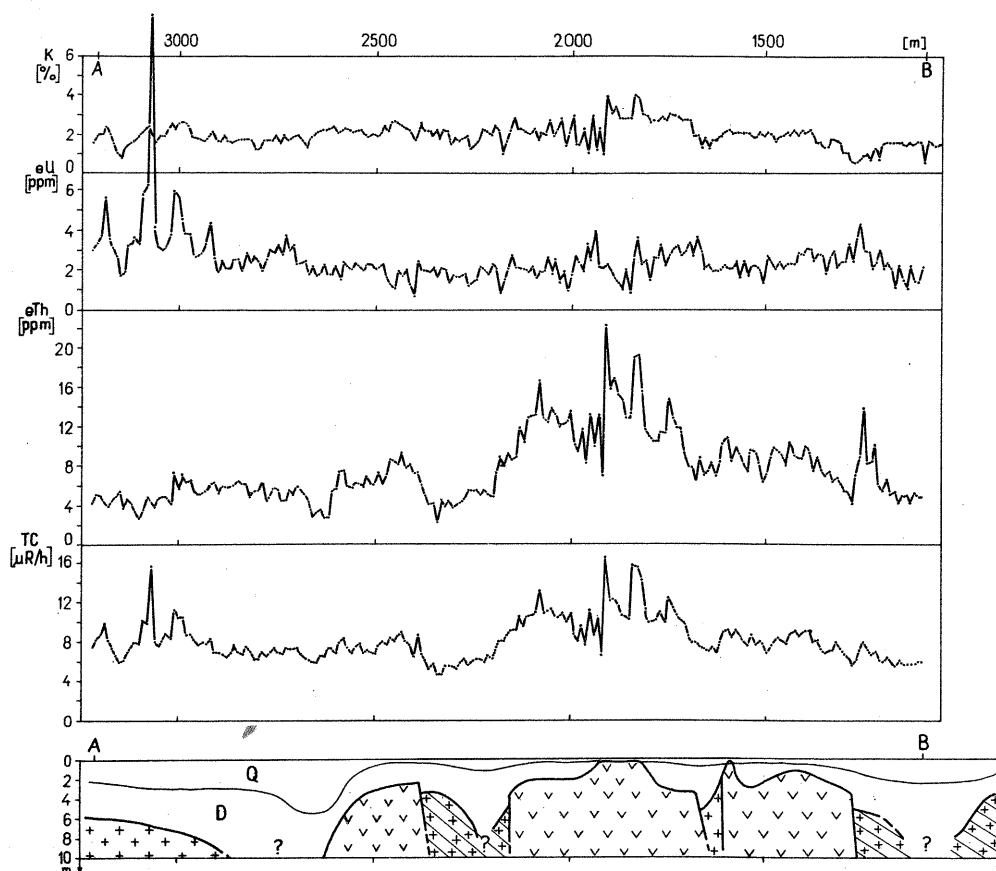


Fig. 11. Wyniki powierzchniowych pomiarów spektrometrycznych wzdłuż linii przekroju, zaznaczonej na fig. 3, wraz z przekrojem geologicznym A-B

Results of surface spectrometric surveys along the line of cross-section (see Fig. 3 for location) and the geological cross-section A-B

Q - utwory czwartorzędowe; D - deluvia; pozostałe objaśnienia jak na fig. 2 i 7

Q - Quaternary sediments; D - deluvia; other explanations as given in Fig. 2 and 7

W tej sytuacji można z dużym prawdopodobieństwem wnioskować, że wyniki archiwalnego zdjęcia emanacyjnego są mało wiarygodne. Może to być związane zarówno z błędem technicznym, jak i metodycznym popełnionym w trakcie realizacji prac polowych lub interpretacyjnych.

W dotychczas prowadzonych pracach poszukiwawczych wyniki zdjęcia emanacyjnego stanowiły podstawowe źródło informacji o mineralizacji torowej na badanym obszarze (J. Mikuszewski i in., 1976). Konsekwencją takiego stanowiska było m.in. prowadzenie szczegółowego rozpoznania wiertniczego przede wszystkim w obrębie największych anomalii torowych (fig. 2). W świetle przedstawionych powyżej argumentów postępowanie takie nie wydaje się właściwe. Wyniki rozpoznania radiometrycznego, w tym przede wszystkim sondowań gamma oraz badań spektrometrycznych, wskazują, że strefa zmineralizowana torem oraz pierwiastkami ziem rzadkich kontynuuje się w kierunku NE znacznie dalej, poza obszar

dotychczas rozpoznany szczegółowymi pracami wiertniczymi i górnictwami. Praktycznie niemal zupełny brak takiego rozpoznania dla tej części strefy anomalnej nie pozwala na ostateczne jednoznaczne rozstrzygnięcie tego zagadnienia. Wyniki badań radiometrycznych wykonanych w północno-wschodniej krawędzi strefy anomalnej, zarówno w otworach archiwalnych, jak i nowych (otwór 102) wskazują na wystąpienie mineralizacji torowej *in situ* (J. Szewczyk, 1981). Można przypuszczać, że strefa zmineralizowana nie kończy się na poprzecznym uskoku w pobliżu otworu 102 (fig. 2), lecz kontynuuje się w utworach podłoża rowu tektonicznego. Jednoznacznych rozstrzygnięć tych zagadnień mogą dostarczyć jedynie wyniki odpowiednio zlokalizowanych prac wiertniczych. Podwyższone zawartości toru w utworach trzeciorzędowych wypełniających rów tektoniczny związane są z mechanicznym transportem toru wraz ze zwietrzeliną utworów podłoża.

Ważnym wnioskiem metodycznym wynikającym z powyższych rozważań, dotyczącym nie tylko poszukiwań rud toru na omawianym obszarze, jest konieczność bardziej krytycznego analizowania i uwzględniania wyników wszystkich badań archiwalnych. Aprioryczne wyróżnianie tylko niektórych spośród nich bez przeprowadzenia takiej analizy może bowiem prowadzić niekiedy do niewłaściwego ukierunkowania prac poszukiwawczych.

#### PODSUMOWANIE

Metoda otworowych spektrometrycznych pomiarów naturalnego promieniowania gamma okazała się bardzo skutecznym i łatwym sposobem bezpośredniego badania mineralizacji torowej.

Wyniki oznaczeń Th oparte na ilościowej metodzie interpretacji pomiarów spektrometrycznych, jak pokazano, przewyższają pod wieloma względami wyniki laboratoryjnych oznaczeń tego pierwiastka. Fragmentaryczność opróbowań, a także nierzadkie przypadki braku rdzenia spowodowały, że niejednokrotnie wyniki pomiarów spektrometrycznych okazywały się jedyną pełną informacją o zawartości nie tylko Th, ale również U w profilach otworów wiertniczych. Wyniki otworowych pomiarów wskazały równocześnie na bardzo niewielką pionową mobilność Th i produktów jego rozpadu w badanym środowisku geologicznym. Między izotopami Th-232, Ra-220 oraz Tl-208 stwierdzono generalnie równowagę promieniotwórczą. W tej sytuacji zarówno metoda emanacyjna (zdjęcie toronowe), jak i metoda pomiarów naturalnego promieniowania gamma w wariancie spektrometrycznym ( $eTh$ ) i sumarycznym (TC) są – w odniesieniu do mineralizacji torowej – metodami bliskiego zasięgu informującymi o koncentracji toru w strefie bezpośredniego sąsiedztwa.

W świetle powyższego osiągnięty dotychczas stopień rozpoznania całego obszaru badań nie pozwala na ostateczne określenie jego perspektyw złożowych, szczególnie w głębszych partiach. Dalszych badań wiertniczych wymaga również dotychczas wykryta strefa mineralizacji torowej, szczególnie w północno-wschodniej części. Wyniki metod radiometrycznych, w tym również metody spektrometrycznej, wskazują na możliwość kontynuacji tej mineralizacji w kierunku N–E.

## PIŚMIENNICTWO

- ADAMS J.A., GASPARINI P. (1970) – Gamma-ray spectrometry of rocks. Elsevier. Amsterdam.
- CZUBEK J.A. (1979) – Recent advances in gamma-ray logs interpretation. W: Evaluation of uranium resources, p. 45–86. IAEA, Vienna.
- IAEA (1979) – Gamma-ray surveys in uranium exploration. Technical Reports Series, 186. IAEA, Vienna.
- MIKUSZEWSKI J., JĘCZMYK M., KURBIEL H., SZEWCZYK J., WYBRANIEC S. (1976) – Projekt robót geologiczno-poszukiwawczych złóż toru i pierwiastków ziem rzadkich w zachodniej części metamorfiku izerskiego. Arch. Inst. Geol. Warszawa.
- PAŁKA K. (1983) – Spektrometria gamma do profilowania otworów wiertniczych. W: Problemy metodyczne wykrywania i badania surowców mineralnych metodami geofizyki wiertniczej, p. 105–114. Kraków.
- STĘPNIĘWSKI M., IWASIŃSKA I. (1981) – Oznaczanie pierwiastków śladowych w krzemianach metodą fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej. Chem. Anal., 26, p. 837–843.
- SZEWCZYK J. (1981) – Dokumentacja metodyczno-wynikowa otworowych pomiarów spektrometrycznych zastosowanych w badaniach mineralizacji torowej w zachodniej części metamorfiku izerskiego. Arch. Inst. Geol. Warszawa.
- SZEWCZYK J. (1984) – Zastosowanie spektrometrycznych pomiarów naturalnego promieniowania gamma w badaniach geofizycznych w Polsce. Prz. Geol., 32, p. 481–487, nr 8–9.
- ГОРБУШИНА Л.В., ЗИМИН Л.Ф., СЕРДЮКОВА А.С. (1970) – Радиометрические и ядерно-геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Атомиздат, Москва.

Ян ШЕВЧИК

### СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТОРИЕВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В СКВАЖИНАХ В СУДЕТАХ

#### Резюме

В статье приведены результаты спектрометрического метода изучения в скважинах естественного гамма излучения в отношении гидротермальной ториевой минерализации. Район исследований расположен в западной части Изерского метаморфического массива (СЗ Судет). Измерения производились четырехканальным скважинным спектрометром, сконструированным в Горно-Металлургической Академии в Кракове, приспособленным для измерений в скважинах глубиной до 100 м. Полевые испытания предвзяло изучение методики измерений и интерпретации. В сумме было выполнено свыше 23 000 точечных измерений в разрезах нескольких сотен мелких скважин. В статье предлагаются результаты сравнения спектрометрических значений  $eTh$  с лабораторными аналитическими значениями  $Th$ . Было установлено, что изотопы  $Th-232$ ,  $Ra-220$  и  $Tl-208$  находятся в радиоактивном равновесии. Судя по результатам скважинных спектрометрических измерений, существует небольшая вертикальная мобильность как  $Th$ , так и продуктов его распада в изучаемой геологической среде. Показано, что результаты количественного означения  $eTh$ , полученные путем интерпретации спектрометрических измерений, более достоверны, чем данные лабораторного анализа означений  $Th$ . Большая изменчивость концентрации  $eTh$  (2–20 000 ппм) существенным образом снизила точность спектрометрического определения  $eU$ , и практически сделала невозможным количественное определение  $K$ .

Немобильность продуктов распада Th-232 в изучаемой геологической среде приводит к выводу равноценности измерений и спектрометрических и излучений.

Результаты количественного определения  $eTh$ , полученные по отдельным скважинам, были использованы для составления карт распределения этого элемента на изучаемой площади. Данные независимых поверхностных спектрометрических измерений свидетельствуют о совпадении всех данных о распределении тория.

Данные по спектрометрическим измерениям в скважинах как ввиду фрагментарности опробования, так и убыли кернов, во многих случаях служили единственным источником полной информации о разрезе с точки зрения содержания  $eTh$  и  $eU$ .

Все эти материалы были в частности использованы для определения запасов тория в пределах открытых и детально разведанных бурением зон ториевой минерализации. Анализ всех радиометрических данных (фондовых также) говорит о возможности продолжения этих зон в СВ направлении.

Jan SZEWCZYK

#### BOREHOLE SPECTROMETRIC GAMMA RAY MEASUREMENTS IN SEARCH FOR THORIUM MINERALIZATION IN THE SUDETY MTS

##### Summary

The paper presents results of use of spectrometric gamma ray method of measurement of natural gamma radiation in search for hydrothermal thorium mineralization. The studies covered an area situated in western part of the Izera metamorphic massif (NW part of the Sudety Mts). Measurements were taken with the use of four-channel borehole spectrometer adjusted to cover depth interval down to 100 m, made at the Academy of Mining and Metallurgy. The field works were preceded by methodological studies on questions connected with both taking measurements and their interpretation. The tests covered several hundreds shallow drillings, in which over 23,000 measurements have been taken.

The paper presents results of comparisons of spectrometric measurements of  $eTh$  and analytical laboratory determinations of Th content. Isotopes Th-232, Ra-220, and Tl-208 have been found to occur in an equilibrium state. Spectrometric logs revealed very slight mobility of both Th and products of its decay in this geological environment in the vertical. It is shown that results of quantitative determinations of  $eTh$ , based on interpretation of spectrometric logs, are more reliable from the point of view of natural sciences than laboratory determinations of Th. It should be noted that a high variability in concentration of  $eTh$  (from 2 to 20,000 ppm) significantly reduced accuracy of spectrometric determinations of  $eU$ , and practically precluded any quantitative estimations of K.

Immobile character of products of decay of Th-232 in the studied geological environment suggests that results of emanational and spectrometric measurements should be comparable.

Results of quantitative determinations of  $eTh$  for individual drillings were subsequently used to compile maps of distribution of this element in the studied area. The results of independently made surface spectrometric measurements showed congruity of the obtained information on distribution of thorium.

Because of limited coring and losses of core material, the obtained spectrometric data were often the only available information on content of  $eTh$  and  $eU$  in the studied borehole columns. The data were also used to evaluate thorium resources in the thorium mineralization zone, discovered and explored in detail by drillings. Analysis of all the results of radiometric surveys (including those from unpublished older reports) indicates possibilities of continuation of the zone of mineralization further to north-east.