

## NOWA RADIOCHEMICZNA METODA POSZUKIWANIA I OBLICZANIA ZASOBÓW ZŁÓŻ RUD URANU

**N**ATURALNE PIERWIĄSTKI PROMIENIOTWÓRCZE zawarte w wodach mineralnych mogą dostarczyć cennych danych o strukturze geologicznej i charakterze podziemnych warstw promieniotwórczych. W interpretacji wyników pomiarów radiochemicznych szeroko korzysta się z praw równowagi promieniotwórczej, które opisują w sposób ilościowy zachowanie się naturalnych pierwiastków promieniotwórczych, tworzących szeregi promieniotwórcze. Równowagę promieniotwórczą osiąga się, gdy pochodny nuklid promieniotwórczy wytwarzany jest ze stałą prędkością przez rozpad długowiecznego macierzystego nuklidu promieniotwórczego. W stanie równowagi promieniotwórczej stosunek ilości atomów dwóch pierwiastków promieniotwórczych szeregu promieniotwórczego pozostaje stały. Ponieważ okres połowicznego rozpadu uranu jest znacznie dłuższy ( $4,5 \cdot 10^9$  lat), od tego okresu dla radu (1622 lata) następuje stan równowagi promieniotwórczej między ilością uranu a ilością jego produktu rozpadu, radu. Jeżeli zastosujemy pojęcie równowagi promieniotwórczej do minerałów uranowych o wieku dostatecznie długim, niezbędnym do osiągnięcia równowagi (tj. gdy wiele okresów połowicznego rozpadu radu upły-

nęło), to stosunek ilości atomów U/Ra będzie dla nich zawsze stały i wynosi  $2,8 \cdot 10^6$ , oznacza to, że na 1 atom radu w mineralu będzie  $2,8 \cdot 10^6$  atomów uranu.

Ilość radu w g ( $E_{Ra}$ ), która jest w równowadze promieniotwórczej z 1 g uranu, obliczyć można w następujący sposób:

$$1 \text{ g radu } (^{226}\text{Ra}) \text{ zawiera } \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{226} \text{ atomów}$$

$$1 \text{ g uranu } (^{238}\text{U}) \text{ zawiera } \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{238} \text{ atomów}$$

$$E_{Ra} = \frac{226 \cdot 1622}{238 \cdot 4,50 \cdot 10^9} = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ g.} \quad (1)$$

W stanie równowagi promieniotwórczej prędkość wytwarzania jest stała. Ilość radu ( $G_{Ra}$ ), która powstaje 1 g uranu na sek., oblicza się następująco:

$$G_{Ra} = \frac{226}{238} \lambda_U = 4,6 \cdot 10^{-18} \text{ g/sek} \quad (2)$$

Uwaga: 226 i 238 — liczby masowe radu i uranu,  $6,02 \cdot 10^{23}$  — stała Avogadry, 1622 i  $4,5 \cdot 10^9$  — okresu połowicznego rozpadu radu i uranu. Zamiast stosunku okresów połowicznego rozpadu można wstawić do wzoru, odpowiednio, stałe rozpadu.

$\lambda_U$  — stała rozpadu uranu.

Podane wyżej wzory mogą w pewnych przypadkach mieć zastosowanie do obliczenia podziemnych złóż rud uranu.

Zastosowanie do pomiarów promieniotwórczych udoskonalonych liczników scyntylicyjnych, zamiast liczników Geigera-Müllera, znacznie rozszerzyło zakres poszukiwania złóż pierwiastków promieniotwórczych. Ponieważ promieniowanie  $\gamma$  nie jest w stanie przenikać grubych warstw skał, więc pomiary promieniotwórcze przeważnie mają skuteczne zastosowanie do wychodni rud uranu lub wymagają wykonania odwiertów.

Poniżej zostanie opisana metoda radiochemiczna, zastosowana w Japonii w r. 1956 przez Y. Yokoyamę do poszukiwania i obliczania zasobów złóż rud uranu. Metoda ta oparta jest na oznaczaniu zawartości radu i jego izotopów w wodach mineralnych i obliczaniu zawartości uranu na podstawie założeń wynikających z praw równowagi promieniotwórczej.

Względna zmienność w częstości występowania radu i radonu w wodach mineralnych tłumaczy się tym, iż woda mineralna przechodząc przez podziemną warstwę uranonośną rozpuszcza rad i radon jako bardziej rozpuszczalne od ich skał macierzystych. Yokoyama zakłada istnienie w źródłach mineralnych dwóch warstw promieniotwórczych. Głęboka warstwa, która jest prawdopodobnie związana z rudami uranu lub toru, może się znajdować na głębokości kilku kilometrów. Tę warstwę uważa się za strefę dostarczającą wodom mineralnym radu i jego izotopów, takich jak tor X, mezotor 1 i aktyn X. Druga warstwa promieniotwórcza, uważana za źródło radonu i toronu w wodach mineralnych, znajduje się bardzo blisko powierzchni ziemi na głębokości 10–50 m.

Do obliczenia ilości uranu, która występuje w strefie dostarczającej rad wodom mineralnym, zastosował autor dwa sposoby, oparte na powyżej podanych wzorach 1, 2.

### I sposób

Ilość radu,  $G_{Ra}$ , która powstaje z 1 g uranu na sekundę, wynosi  $4,6 \cdot 10^{-18}$  g/sek. Jednak ilość radu, która jest dostarczana do wód mineralnych na sekundę, wynosi  $C_{Ra} \cdot F$ , gdzie  $C_{Ra}$  oznacza zawartość radu w wodach mineralnych W (g/l), a F ilość przepływu l/sek. Na podstawie dostarczonej dawki radu można się więc spodziewać, że w strefie dostarczania jest następująca ilość uranu, W:

$$W = \frac{C_{Ra} \cdot F}{G_{Ra} \cdot K} \text{ g} \quad (3)$$

gdzie K oznacza współczynnik rozpuszczalności radu z rud uranu w wodach mineralnych. Dokładna wartość K jest nieznana, zwykle zakłada się, że  $K = 0,10$ . W przypadku doskonałej rozpuszczalności  $K = 1,00$ . Jako przykład podaje Y. Yokoyama obliczenie dla Gorącego Źródła Arima, posiadającego największą w Japonii zawartość  $C_{Ra}$ , wynoszącą  $2 \cdot 10^{-10}$  g/l, przy  $F = 5$  l/sek.

$$W = \frac{2 \cdot 10^{-10} \cdot 5}{4,6 \cdot 10^{-18} \cdot K} = \frac{2 \cdot 10^8}{K} \text{ g} = \frac{200 \text{ ton}}{K} \quad (4)$$

Można więc się spodziewać, że pod ziemią w obszarze Gorącego Źródła Arima znajduje się 200 t lub 2000 t uranu, zależnie od tego czy przyjmuje się dla  $K = 0,10$  czy  $K = 1,00$ .

Yokoyama stwierdził, iż wody mineralne zwykle zawierają porównywalne zawartości toru X i mezotoru 1 (tabl. I). Oznacza to, że współczynnik rozpuszczalności radu i jego izotopów nie jest duży. Tłumaczy to w następujący sposób: gdyby mezotor 1 roz-

puszczał się doskonale w wodach mineralnych, to byłoby niemożliwe dostarczenie toru X wodom mineralnym ze strefy dostarczania, ponieważ (w tym przypadku) w strefie dostarczania nie byłoby mezotoru 1 i jego produktów rozpadu (radiotoru i toru X).

Tabela I

IZOTOPY RADU W WODACH MINERALNYCH

Nazwa źródła	$^{226}\text{Ra}$ $10^{-12}$ c/l*	$^{224}\text{Ra}$ (ThX) $10^{-12}$ c/l	$^{228}\text{Ra}$ (MsThI) $10^{-12}$ c/l	$^{225}\text{Ra}$ (AcX) $10^{-12}$ c/l
Arima Shin-osen	$170 \pm 5$	$560 \pm 20$	$580 \pm 10$	$9 \pm 0,5$
Arima Ariake-no-yo	$170 \pm 7$	$310 \pm 10$	$380 \pm 20$	$9 \pm 0,9$
Ikeda No 1	$33 \pm 1$	$100 \pm 2$	$85 \pm 8$	—
„ No 2	$36 \pm 3$	$113 \pm 12$	$53 \pm 7$	—
Masutomi A 5	$66 \pm 3$	$200 \pm 7$	$230 \pm 10$	—
„ B 7	$24 \pm 1$	$66 \pm 2$	$240 \pm 1$	$1,3 \pm 0,1$
Misasa Misasa-kan	$14 \pm 1$	$34 \pm 2$	$38 \pm$	—

\* c/l = curie na litr. Ilość substancji odpowiadająca jednemu curie zależy od długości okresu połowicznego rozpadu.

### II sposób

Jak wynika z równania (1), ilość radu  $E_{Ra}$ , będąca w równowadze promieniotwórczej z 1 g uranu, wynosi  $3,4 \cdot 10^{-7}$  g radu. W okresie czasu T sek. ilość radu wyniesiona na powierzchnię ziemi przez wodę mineralną wynosi  $C_{Ra} \cdot F \cdot T$  g. Na podstawie całkowitej ilości dostarczonego radu można spodziewać się następującej ilości uranu, W', obecnej w strefie dostarczania:

$$W' = \frac{C_{Ra} \cdot F \cdot T}{E_{Ra} \cdot K'} \quad (5)$$

gdzie K' oznacza stosunek ilości radu, która jest rozpuszczona w wodach mineralnych do całkowitej ilości radu.

Yokoyama podaje następujący przykład dla Gorącego Źródła Arima. Przyjmując  $T = 100$  lat ( $3 \cdot 10^8$  sek.) i  $T = 1000$  lat ( $3 \cdot 10^{10}$  sek.), otrzymuje

$$W' = \frac{2 \cdot 10^{-10} \cdot 5 \cdot 3 \cdot 10^9}{3,4 \cdot 10^{-7} \cdot K'} = \frac{10 \text{ ton}}{K'} \text{ dla } 100 \text{ lat}$$

$$W' = \frac{2 \cdot 10^{-10} \cdot 5 \cdot 3 \cdot 10^{10}}{3,4 \cdot 10^{-7} \cdot K'} = \frac{100 \text{ ton}}{K'} \text{ dla } 1000 \text{ lat } (6)$$

Powyższe obliczenie wskazuje, że wartość W' w równaniu (6) jest tego samego rzędu co wartość W w równaniu (4), przy długości okresu czasu rzędu okresu połowicznego rozpadu radu. Oba sposoby obliczania dadzą praktycznie zbliżone wartości, jeżeli wpływ wód mineralnych odbywa się w ciągu dłuższego okresu czasu, w którym zachodzi pewnego rodzaju stan równowagi między wylugowaniem radu a dostarcza-

Tabela II

ILOŚĆ URANU OZNACZONA METODĄ RADIOCHEMICZNA

Nazwa źródła	Ra zawartość $10^{-12}$ g/l	Ilość prze- pływu l/sek	Ra wydnie- lanie $10^{-12}$ g/sek	Ilość uranu	
				K=1,00	K=0,10
Tamagawa Akita	20	150	3000	700	7000
Arima Hyogo	300	5	1000	200	2000
Masutomi Yamanashi	30	2	60	10	100
Matsunoyama Niigata	15	4	60	10	100
Misasa Tottri	15	3	45	10	100
Yugakae Shimane	30	1	30	7	70

niem. Stwierdzone przez Yokoyamę wyniki i obliczenia podaje tabela II. Dla potwierdzenia swej metody podaje Yokoyama następujące fakty. Największe ilości uranu wykryte dawniej w Japonii Suisho-yama obliczono na około 1 do 2 t. uranu metalu lub 2000—4000 t. minerałów uranowych. Średnia zawartość U wynosiła 0,05%. W tabeli II ilości uranu oznaczone przez autora w niektórych źródłach mi-

neralnych są znacznie wyższe. Autor podaje, że ostatnio wykryto nowe złożo uranu w Ogamo Mine blisko Gorącego Źródła Misasa, które jest jednym z największych źródeł radioaktywnych w Japonii.

(Na podstawie: *Istope Geology*. K. Rankama, London 1954; i „*Bull. Chem. Soc. Japan*”, t. 29, nr 6, 1956.).