

Zastosowanie badań izotopowych do wyznaczania wieku bezwzględnego pokładów geologicznych

(metoda Rb-Sr) *

Jedną z najmłodszych a zarazem nojszerzej obecnie stosowanych metod wyznaczania wieku bezwzględnego pokładów geologicznych jest metoda rubidowo-strontowa. Metoda ta oparta jest na zjawisku naturalnej promieniotwórczości izotopu rubidu o masie 87, który na drodze przemiany promieniotwórczej β^- przechodzi w izotop strontu również o masie 87. Metoda geochronologii izotopowej oparta na tym zjawisku powstała w latach 1953-54 [3, 12, 18], mimo że promieniotwórczość izotopu ^{87}Rb znana była już od dawna [10, 16]. Było to związane z powstaniem i rozwojem szeregu specjalnych, niebywale czułych i dokładnych technik analitycznych - głównie dokładnych pomiarów stosunków izotopowych przy zastosowaniu spektrometru mas, metodyki rozcieńczania izotopowego oraz sposobów ilościowego oddzielenia rubidu od strontu w chromatograficznych kolumnach jonitowych.

Naturalny stront ma cztery trwałe izotopy. Ich względna częstość występowania - wg danych Bainbridge'a i Niera - przedstawia się następująco: $^{84}\text{Sr} - 0,56\%$, $^{86}\text{Sr} - 0,24\%$, $^{87}\text{Sr} - 7,02\%$, $^{88}\text{Sr} - 82,56\%$ [2].

Naturalny rubid zaś ma dwa izotopy o następującej względnej częstości występowania: $^{85}\text{Rb} - 72,15\%$, $^{87}\text{Rb} - 27,85\%$ - /wg Niera/ - [15].

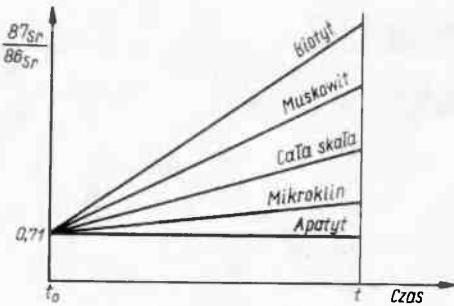
Izotop ^{87}Sr , jako trwały produkt przemiany β^- promieniotwórczego izotopu ^{87}Rb , gromadzi się z upływem czasu jako stront radiogeniczny w minerałach zawierających rubid. Okres połowicznego zaniku przemiany izotopu ^{87}Rb wynosi $4,70 \cdot 10^{10}$ lat, zaś stała rozpadu λ wynosi $1,47 \cdot 10^{-11} \text{ lat}^{-1}$ [9].

Całość strontu obecnego na Ziemi możemy podzielić na stront zwyczajny - złożony ze wszystkich czterech wymienionych wyżej izotopów - o własnej indywidualności geochemicznej oraz stront radiogeniczny $^{87}\text{Sr}^x$ - obecny w minerałach zawierających rubid.

Procesy wietrzenia uwalniają stront radiogeniczny z zawierających go minerałów i włączają w obieg geochemiczny strontu zwyczajnego. Stały dopływ ^{87}Sr radiogenicznego do strontu zwyczajnego przyczynia się do tego, że skład izotopowy strontu

*/ Referowano w Warszawie dnia 6 czerwca 1972 r. na Konwersatorium Analizy Spektralnej Emisyjnej, poświęconym Spektrometrii Mas.

ziemskiego zmienia się w skali czasu. Miarą tej zmiany jest wzrost stosunku $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Szybkość wzrostu tego stosunku zależy od wartości stosunku Rb/Sr w danym środowisku geochemicznym. Im jest on wyższy, tym szybciej w skali czasu wzrastać będzie stosunek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Na rys. 1 przedstawiono zależność stosunku $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ od czasu dla skały złożonej z apatytu, mikroklinu, muskowitu i biotytu. Jeżeli założymy, że w momencie powstania /krystalizacji/ we wszystkich składnikach tej skały, a zatem i w całej



Rys. 1. Zależność wartości stosunku $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ od czasu /wykres ewolucji strontu/ - wg Hamiltona [12].

tej skale również, stosunek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ wynosił 0,71, to z biegiem czasu stosunek ten będzie wzrastał, ponieważ zawartość ^{86}Sr pozostaje niezmienna, rozpad zaś ^{87}Rb dostarcza stale radiogenicznego izotopu ^{87}Sr . Wzrost stosunku $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ jest najszybszy dla biotytu /ponieważ zawiera on najwięcej promieniotwórczego rubidu/, nieco wolniejszy dla muskowitu i znacznie wolniejszy dla mikroklinu. W apatycie natomiast wobec całkowitego braku rubidu stosunki izotopowe strontu pozostają bez zmian. Dla całej skały wzrost tego stosunku jest pośredni, wynikający z jej składu mineralnego. Wielkościami, które można

tu określić doświadczalnie, są: obecny stosunek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla każdego minerału /w chwili t /, a także stosunek $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ decydujący o kącie nachylenia prostej dla danego minerału. Dysponując tymi danymi można znaleźć punkt przecięcia prostych otrzymanych dla poszczególnych minerałów. Współrzędnymi tego punktu będą: pierwotny stosunek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oraz czas t_0 - przedstawiający moment powstania danej skały. Opisane wyżej zależności zachodzą dla przypadku idealnego w którym zakładamy, że skała jako całość była układem zamkniętym. Oznacza to, że w ciągu całej historii skały ani stront, ani rubid nie zostały do niej doprowadzone lub z niej usunięte. Przypadek idealny - zakłada się również, że podczas historii skały nie nastąpiły żadne procesy metamorficzne.

Wykorzystanie rozpadu promieniotwórczego ^{87}Rb do wyznaczania wieku bezwzględno geologicznych oparte jest na następującej zależności, wyprowadzonej ze znanych praw rządzących rozpadem promieniotwórczym pierwiastków:

$$r = \frac{i}{\lambda} \ln \left(\frac{^{87}\text{Sr}^x}{^{87}\text{Rb}} + 1 \right) \quad /1/$$

W równaniu tym $^{87}\text{Sr}^x$ oznacza liczbę atomów tego izotopu strontu powstałych w wyniku przemiany promieniotwórczej izotopu rubidu; ^{87}Rb , oznacza liczbę atomów izotopu rubidu o masie 87 istniejących w chwili obecnej, λ - stałą rozpadu promieniotwórczego, t - czas jaki upłynął od momentu powstania skały do chwili obecnej.

Jednakże ze względu na to, że spektrometr mas, który jest głównym narzędziem w badaniach izotopowych nie pozwala zmierzyć bezwzględnych zawartości poszczególnych izotopów, lecz daje jedynie możliwość pomiaru stosunków izotopowych - zawartość izotopu ^{87}Sr i ^{87}Rb odnosimy zwykle do zawartości izotopu ^{86}Sr . Zatem równanie /1/ przyjmie postać:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}_t / {}^{86}\text{Sr}_t}{{}^{87}\text{Rb}_t / {}^{86}\text{Sr}_t} + 1 \right) \quad /2/$$

Jeżeli jednak badana skała lub minerał zawierały w chwili powstania pewną ilość strontu zwyczajnego, to miarą wieku jest ilość radiogenicznego strontu ${}^{87}\text{Sr}$, która będzie równa obecnej zawartości ${}^{87}\text{Sr}_t$ zmniejszonej o ilość pierwotną ${}^{87}\text{Sr}_0$:

$${}^{87}\text{Sr}_t^* = {}^{87}\text{Sr}_t - {}^{87}\text{Sr}_0. \quad /3/$$

Po podzieleniu ostatniego równania stronami przez ${}^{86}\text{Sr}$ otrzymamy:

$$\left(\frac{{}^{87}\text{Sr}^* / {}^{86}\text{Sr}}{t} \right) = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}}{t} \right) - \left(\frac{{}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}}{0} \right). \quad /4/$$

Zatem w celu uzyskania przyrostu wartości stosunku interesującej nas pary izotopów w zależności od czasu, jaki upłynął od momentu krystalizacji minerału do chwili obecnej, należy od obecnie zmierzonej wartości tego stosunku odjąć wartość, która cechowała minerał podczas jego krystalizacji. Ostatecznie więc wiek minerału lub skały obliczamy ze wzoru:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\left(\frac{{}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}}{t} \right) - \left(\frac{{}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}}{0} \right)}{\left(\frac{{}^{87}\text{Rb} / {}^{86}\text{Sr}}{t} \right)} + 1 \right). \quad /5/$$

Wartość stosunku ${}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}_t$ oznaczamy przy użyciu spektrometru mas, natomiast wartość stosunku ${}^{87}\text{Rb} / {}^{86}\text{Sr}_t$ wyliczamy znając zawartość ${}^{87}\text{Rb}$ i ${}^{86}\text{Sr}$ w badanym mineralu - wyznaczoną przy zastosowaniu spektrometru mas metodą rozcieńczenia izotopowego [19], bądź metodą fluorescencji rentgenowskiej [12].

Wygodną metodę analizy wyników dotowań opracowano w Instytucie Bernarda Price w Johannesburgu [11, 14, 17]. Metoda ta zwana metodą izochron lub metodą B, P, I. oparta jest na zapisanej nieco inaczej zależności /3/:

$${}^{87}\text{Sr}_t = {}^{87}\text{Sr}_0 + {}^{87}\text{Rb}_t / e^{\lambda t} - 1/. \quad /6/$$

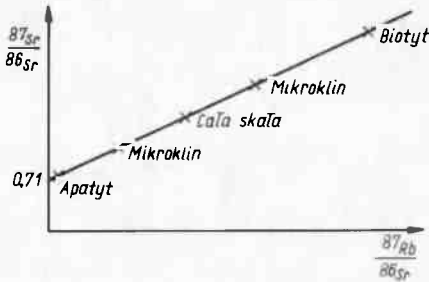
Po podzieleniu stronami przez ${}^{86}\text{Sr}$ /zawartość tego izotopu nie ulega zmianom w czasie/ otrzymujemy:

$$\left(\frac{{}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}}{t} \right) = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}}{0} \right) + \left(\frac{{}^{87}\text{Rb} / {}^{86}\text{Sr}}{t} \right) / e^{\lambda t} - 1/. \quad /7/$$

Jak iarwo zauważyć, równanie to jest równaniem prostej przedstawiającej zależność wartości stosunku ${}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}$ od ${}^{87}\text{Rb} / {}^{86}\text{Sr}$. Wyrażenie $/e^{\lambda t} - 1/$ określa tangens kąta nachylenia otrzymanej prostej. Zatem wspólną cechą punktów, przez które przechodzi ta prosta, jest tako sama wartość stosunku $\left(\frac{{}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}}{0} \right)$ w chwili powstania skały lub minerału oraz wiek - stąd pochodzi nazwa metody: metoda izochron.

Wykonując pomiary stosunków izotopowych dla kilku minerałów wyseparowanych z tej samej skały uzyskamy izochronę, której kąt nachylenia określa wiek skały, natomiast miejsce przecięcia osi pionowej $\left(\frac{{}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}}{0} \right)$ daje wartość początkową /w momencie powstania skały/ stosunku ${}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}$. W celu sprawdzenia wartości początkowej tego stosunku należy przeprowadzić badania dla minerału nie zawierającego rubidu.

Rys. 2 przedstawia izochronę otrzymaną przy założeniu idealnego przypadku - skała stanowi układ zamknięty i w czasie historii skały nie nastąpiły w niej zmiany metamorficzne. W przypadku kilku współistniejących próbek, mających różne zawartości rubidu, w próbce z większą zawartością rubidu w przeciągu czasu t powstaje większa ilość ^{87}Sr radiogenicznego i wobec tego będzie ona leżeć odpowiednio dalej na izochronie niż próbka z małą zawartością rubidu /rys. 2/.



Rys.2. Wykres izochrony, przedstawiający zależność wartości stosunku $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ od wartości stosunku $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - otrzymany dla próbki całej skały i wyseparowanych z niej minerałów. Kąt nachylenia izochrony pozwala określić wiek badanej skały wg Nicolaysena [14].

W celu otrzymania ilościowych danych metoda ta wymaga badania przynajmniej dwóch próbek całej skały, ale oczywiście im ich będzie więcej, tym statystyka będzie lepsza. Największa trudność polega na wyznaczeniu wartości stosunku $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Wartość tę wylicza się znając stosunek Rb/Sr w danej skałe lub mineralu, wyznaczony /po całkowitym oddzieleniu rubidu od strontu metodą chromatograficzną w kolumnach jonitowych/ np. metodą rozcieńczenia izotopowego przy zastosowaniu spektrometru mas.

i wyodrębnionych minerałów - metodą rubidowo-strontową.

W trudniejszych i bardziej skomplikowanych przypadkach dobre rezultaty można osiągnąć jedynie badając ten sam materiał skalny różnymi metodami stosowanymi obecnie w geochronologii, np. datowanie cyrkonów metodami ołowiowymi, łuszczaków metodą potasowo-argonową, całych skał zaś

ilustracją praktycznego zastosowania opisywanej metody mogą być uzyskane przez autora wyniki oznaczeń wieku bezwzględnego granitów Przedgórze Sudeckiego z masywu Strzelin - Żulova i Strzegom - Sobótka. Wyznaczanie wieku bezwzględnego tych skał przeprowadzono metodą Rb-Sr w ZWO Laboratorium voor Isotopen-Geologie w Amsterdamie /Holandia/. Stosunki izotopowe mierzono przy pomocy spektrometru mas z sektorowym /90-stopniowym/ polem magnetycznym /spektrometr typu CH-5, firmy Atlas/, Spektrometr ten miał dwutośmowe termomisyjne źródło jonów z rozdzielonym procesem parowania i jonizacji. Wartość stosunku $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ wyliczano stosując metodę rozcieńczania izotopowego, jak również metodę fluorescencji rentgenowskiej.

Dane doświadczalne uzyskane przez autora oraz wyliczony wiek bezwzględny badanych próbek zestawiono w poniższej tabelicy:

WYNIKI OZNACZEN WIEKU BEZWZGLĘDNEGO GRANITÓW METODĄ Rb-Sr

Tablica 1

Typ próbki	Zawartość Rb ppm wag.	Zawartość Sr ppm wag. a/	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ b/	^{87}Sr radiog. ppm wag. c/	Wiek bez- wzgl. x 10^6 lat. d/
1	2	3	4	5	6
granit l. /Strzelin/	188,5	101,9	0,7306	0,214	261 ± 10

1	2	3	4	5	6
granit 2. /Strzelin/	187,2	102,2	0,7305	0,205	262 ± 10
granit 3. /Strzegom/	191,1	8,43	0,7359	0,213	267 ± 10
granit 4. /Strzegom/	187,5	103,0	0,7309	0,210	269 ± 10

a/ Początkowy Sr + radiogeniczny ^{87}Sr .

b/ Wartość stosunków $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ normalizowano wg wartości stosunku $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8,3751$.

c/ Początkową /w momencie powstania skały/ wartość stosunku $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ przyjmowano równą 0,710.

d/ Przy obliczeniach wieku przyjmowano: skała rozpadu $\beta^{-87}\text{Rb}$ wynosi $\lambda = 1,47 \cdot 10^{-11} \text{ lat}^{-1}$.

Uzyskany metodą rubidowo-strontową wiek bezwzględny granitów Strzelińskich i Strzegomskich porównano z podobnymi wynikami wieku granitów pochodzących z tych samych masywów, uzyskanymi metodą potasowo-argonową przez T. Depciucha [4, 5, 6, 7]. Stwierdzono bardzo dobrą zgodność porównywanych wyników, co dowodzi poprawności uzyskanych rezultatów. Średni wiek badanych próbek wynosi $268 \cdot 10^6$ lat, metoda K-Ar dała wynik $269 \cdot 10^6$ lat/.

Pełny zestaw wszystkich przebadanych próbek i dokładne opracowanie uzyskanych rezultatów zostanie opublikowane w terminie późniejszym.

Literatura

1. Aldrich L.T., Herzog L.F., Holyk W.K., Whiting F.B., Ahrens L.H.: Phys. Rev. 89, 631, 1953.
2. Boinbridge K.T., Nier A.O.: Prelim. Rep. No 9. Nucl. Sci. Nat. Res. Coun. U.S., Washington D.C. 1959.
3. Davis G.L.: Carnegie Inst. Year Book. 1954.
4. Depciuch T.: Kwartalnik Geologiczny, 15, 4, 865, 1971.
5. Depciuch T., Lis J.: Kwartalnik Geologiczny, 15, 1, 95, 1972.
6. Depciuch T., Lis J.: Kwartalnik geologiczny, 15, 4, 855, 1971.
7. Depciuch T., Lis J.: Kwartalnik Geologiczny, 15, 3, 497, 1971.
8. Faure G., Hurley P.M.: J. Petr., 4, 31, 1963.
9. Flynn K.F., Glendenin L.E.: Phys. Rev. 116, 744, 1959.
10. Hahn O., Strossman F., Walling E.: Naturwissenschaften, 25, 189, 1937.
11. Holes A.L.: Proc. Roy. Soc., A, 258, 1292, 1, 1960.
12. Hamilton E.J.: Applied Geochronology. Academic Press London - New York, 1965.
13. Hedge G.E., Walthall F.G.: Science. 140, 3572, 1214, 1963.
14. Nicolaysen L.O.: Annales N.Y. Acad. Sci. 91, 198, 1961.
15. Nier A.O.: Phys. Rev., 77, 789, 1950.
16. Strassmann F., Walling E.: Ber. Dtsch. Chem. Ges., 8, 71, 1, 1938.
17. Scheilds R.M.: Twelfth Annual Progress Report for 1964, U.S. Atomic Energy Commission, Contract A.T. /30 - 1/ - 1381, 3, 1964.
18. Tomlinson R.H., Das Gupta A.K.: Can J. Chem., 31, 909, 1953.
19. Webster R.K.: Methods in Geochemistry, /ed. A.A. Smales and L.R. Wager/, Interscience Publ. Inc. New York - London 1960.