

KRYTERIA DOBORU IZOTOPÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH DO BADAŃ HYDROGEOLOGICZNYCH

STOSUNKOWO młodą, lecz bardzo obiecującą dziedziną zastosowań izotopów promieniotwórczych jest użycie ich w badaniach hydrogeologicznych. Wprowadzenie do badań hydrogeologicznych techniki izotopowej pozwala na znaczne uproszczenie badań, a w wielu przypadkach jest to jedyna możliwa metoda pomiaru.

Izotopy promieniotwórcze mogą być użyte do określania wielu parametrów hydrogeologicznych, m. in. do badania kierunku i prędkości przepływu wód podziemnych, określania stref zasilania, dróg dalekiego krążenia, infiltracji, przecieków wód do kopalni itp. Wachlarz zastosowań izotopów promieniotwórczych jest bardzo szeroki, stąd też do zbadania określonego problemu konieczny jest dobór najbardziej odpowiedniego izotopu promieniotwórczego.

W chwili obecnej w radiometrycznych pracach hydrogeologicznych stosuje się kilkanaście różnych izotopów promieniotwórczych. Najczęściej stosowane izotopy podano w tab. I. Przy wyborze jednego z nich należy brać pod uwagę zarówno własności chemiczne i fizyczne izotopu promieniotwórczego, jak również własności środowiska, w którym prowadzone będą badania. Można wymienić kilka podstawowych własności izotopów promieniotwórczych i środowiska badań, które decydują o wyborze wskaźnika promieniotwórczego.

Przy wyborze izotopu promieniotwórczego należy brać pod uwagę następujące czynniki:

- 1) okres połowicznego zaniku,
- 2) rodzaj i energię promieniowania,
- 3) postać chemiczną,
- 4) radiotoksyczność i dopuszczalne stężenie w wodzie,
- 5) cena, dostępność i ilość izotopu wybranego do badań.

Własności środowiska, które muszą być uwzględnione, to:

1) budowa geologiczna, 2) własności sorbcyjne i jonowymienne skał, 3) rozcieńczenie wskaźnika.

Jak wynika z tab. I mamy do dyspozycji w badaniach hydrogeologicznych izotopy promieniotwórcze o różnym okresie połowicznego zaniku, od kilku godzin do kilkunastu lat. Należy dobrać izotopy o jak najkrótszym okresie połowicznego zaniku, aby nie powodować nadmiernego i zbytecznego skażenia obszaru badań, a jednocześnie, by okres ten był dłuższy od zaplanowanego czasu badań, aby nie uległ on rozpadowi promieniotwórczemu przed osiągnięciem punktu pomiaru. Do badań przepływu wody na niewielkich odległościach lub też dużych prędkościach wody można użyć izotopu o okresie połowicznego zaniku od kilku godzin do kilkunastu dni, przy dużych odległościach lub małych prędkościach prze-

Tabela I
IZOTOPY PROMIENIOTWÓRCZE NAJBARDZIEJ
ODPOWIEDNIE DO BADAŃ HYDROGEOLOGICZNYCH

Izotop	Okres połowicz. zaniku	Energia promieniowania γ MeV	Energia promieniowania β MeV	Dopuszczalne stężenie w wodzie $\mu\text{c/ml}$
Au ¹⁹⁸	2,70 d	0,41	0,96	$4 \cdot 10^{-3}$
Br ⁸²	35,90 g	0,77	0,44	10^{-3}
Co ⁶⁰	5,27 l	1,17	0,31	10^{-3}
Cr ⁵¹	27,80 d	0,32	0,31	0,05
Fe ⁵⁹	45,00 d	1,29	0,46	$2 \cdot 10^{-3}$
J ¹³¹	8,05 d	0,36	0,61	$6 \cdot 10^{-5}$
Ir ¹⁹²	74,00 d	0,32	0,67	10^{-3}
Na ²⁴	15,00 g	4,75	1,39	$8 \cdot 10^{-4}$
P ³²	14,30 d	—	1,71	$5 \cdot 10^{-4}$
Rb ⁸⁶	18,60 d	1,10	1,77	$7 \cdot 10^{-4}$
Sb ¹²⁴	60,00 d	0,60	0,63	$7 \cdot 10^{-4}$
S ³⁵	87,00 d	—	0,167	$8 \cdot 10^{-3}$
Sc ⁴⁶	84,00 d	1,12	0,36	10^{-3}
T(H ³)	12,26 l	—	0,00186	—
Zn ⁶⁵	245,00 d	1,11	0,33	$3 \cdot 10^{-3}$

plywu wody okres połowicznego zaniku użytego izotopu musi być odpowiednio dłuższy. Należy przyjąć, iż izotop promieniotwórczy użyty do badań przepływu musi mieć okres połowicznego zaniku kilkakrotnie dłuższy od przypuszczalnego czasu trwania badań, tak, aby w chwili osiągnięcia punktu pomiarowego jego stężenie w wodzie nie nastęrczało trudności pomiarowych. W ogólnym przypadku zmniejszenia ilości wprowadzonego wskaźnika promieniotwórczego w czasie przepływu można określić następująco:

$$Aw = Am + Ar + As \quad (1)$$

gdzie:

- Aw — ilość wprowadzonego wskaźnika,
- Am — ilość wskaźnika w strefie pomiaru,
- Ar — straty wskaźnika w wyniku jego rozpadu promieniotwórczego,
- As — straty wskaźnika spowodowane sorbcją i wymianą jonową w trakcie przepływu.

Ponieważ straty spowodowane rozpadem wynoszą:

$$Aw - Ar = Aw \cdot e^{-0,693 \frac{t}{T}} \quad (2)$$

gdzie:

- t — czas przepływu izotopu,
- T — okres połowicznego zaniku izotopu,

to w całym procesie przepływu powinno być zachowane równanie:

$$Am = Aw \cdot e^{-0,693 \frac{t}{T}} - As \quad (3)$$

Czas przepływu izotopu t jest związany z odległością między otworem, w którym zadano izotop, a pomiarowym (1) oraz rzeczywistą prędkością przepływu wody (v) następującą zależnością:

$$t = \frac{1}{v} \quad (4)$$

Z reguły najwygodniej jest stosować izotopy o dużej energii promieniowania γ . Im większą energię ma użyty izotop, tym łatwiej można wykryć jego obecność w punkcie pomiarowym, przy mniejszym jego stężeniu, krótszym czasie pomiaru oraz przy użyciu prostszej aparatury pomiarowej. Przy badaniach, gdzie nie pobiera się próbek wody, a dokonu-

Tabela II
STRATY WSKAŹNIKÓW WYWOŁANE SORBCJĄ

Izotop	Postać chemiczna	% strat
—	fluoresceina	20
H ³	H ₂ O	0
J ¹³¹	KJ	5
J ¹³¹	CH ₃ J	10
Na ²⁴	NaCl	ponad 10
Br ⁸²	CH ₃ Br	ponad 10
Rb ⁸⁶	RbCl	5
Sb ¹²⁴	EDTA	2

Tabela III
ABSORBCJA WSKAŹNIKÓW W POSTACI JONOWEJ
I CHELATOWEJ

Izotopy	Postać	straty w %
Co ⁶⁰	CoCl ₂	86
	EDTA	2
Cr ⁵¹	CrCl ₃	83
	EDTA	3
Sb ¹²⁴	SbU ₃	94
	EDTA	30

je się pomiaru bezpośrednio w otworze, używać należy promieniotwórczych izotopów gamma, a beta tylko w specyficznych przypadkach. Większość izotopów promieniotwórczych używanych do badań przepływów wykazuje dużą energię promieniowania γ , a więc dobór izotopu o odpowiedniej energii nie stwarza żadnych trudności.

Postać chemiczna izotopu promieniotwórczego użytego jako wskaźnika ma decydujące znaczenie dla jego zachowania się w środowisku, przez które przepływa i gdzie istnieje możliwość sorbcji i wymiany jonowej. Roztwory wodne tracą stopniowo wskaźnik wskutek kontaktu z ciałami stałymi. Straty te mogą powstać z powodu adsorbcji, chemosorbcji, podczas której wskaźnik reaguje chemicznie z adsorbentem lub przez wymianę jonową, podczas której jony wskaźnika zastępują niektóre jony wchodzące w skład skał, te zaś wchodzą na ich miejsce do roztworu. W niektórych przypadkach straty spowodowane sorbcją i wymianą jonową wskaźnika mogą być tak duże, że nie dociera on w wymiernych ilościach do strefy pomiaru. W tab. II podano straty różnych wskaźników promieniotwórczych wskutek sorbcji badanej w warunkach laboratoryjnych. Jak widać z tabeli ten sam izotop promieniotwórczy (np. J¹³¹) ulega sorbcji różnie, zależnie od postaci chemicznej. Szczególnie dobrze zależność tę ilustruje tab. III, w której porównano sorbcję kilku izotopów promieniotwórczych w postaci chelatów i związków jonowych (chlorków). Roztwory zawierające te wskaźniki promieniotwórcze były przepuszczane przez kolumny drobnoziarnistego, nieco zwiertzałego łupku wapiennego, którego zdolność wymiany jonowej wynosiła 30 mg równoważników na 100 g. Różnice w pochłanianiu rozmaitych form chemicznych niektórych wskaźników są jak widać bardzo duże.

Dobór wskaźnika z punktu widzenia jego własności sorbcyjnych powinien być przeprowadzany oddzielnie dla każdego badanego przypadku, ponieważ środowisko sorbujące jest różnorodne i zmienne. Wielkość sorbcji zależy od kilku czynników, takich, jak: powierzchnia sorbenta, jego skład chemiczny, pH środowiska i obecność domieszek. W literaturze

znaleźć można dane dotyczące sorbcji określonych wskaźników promieniotwórczych w różnych warunkach i na różnych sorbentach. W szeregu prac stwierdzono, iż większość gleb i torfów intensywnie pochłania z przepływających roztworów kationy. Utrudnione jest w tych przypadkach stosowanie izotopów: Na²⁴, Ca⁴⁵, Co⁶⁰, Zn⁶⁵, Sb⁸⁶. W warunkach dużej sorbcji kationów bardziej celowe jest stosowanie izotopów stanowiących anion związku (S³⁵, Cl³⁸, Br⁸², J¹³¹).

Oprócz sorbcji dużą rolę w pochłanianiu wskaźników izotopowych przez środowisko mogą mieć procesy wymiany jonowej. Oba te procesy, sorbcja i wymiana jonowa odgrywają decydującą rolę przy badaniach przepływu przez takie środowiska, jak: gleby, torfy, gliny i skały wapniowe, które posiadają zwiększoną aktywność sorbcyjną i jonowymienną. Minimalną sorbcją charakteryzują się związki kompleksowe z grupy chelatów, są to związki kompleksowe niektórych izotopów promieniotwórczych z kwasem etylenodwuamino-czteroołtowym (EDTA). Ponieważ w skład tych kompleksów można wprowadzać różne izotopy o własnościach odpowiednich do celu badań, zastosowanie związków kompleksowych ma bardzo duże perspektywy.

Najlepszym wskaźnikiem do badania przepływów wód podziemnych jest izotop wodoru — tryt. Wchodzi on w skład cząsteczki wody (HTO), nie ulega więc sorbcji ani wymianie jonowej. Jest on najodpowiedniejszym wskaźnikiem przy badaniu dróg dalekiego krążenia wód, badaniu przepływu w środowiskach o dużej sorbcji i silnych właściwościach jonowymiennych. Duże trudności pomiarów trytu ograniczają nieco jego zastosowanie w badaniach hydrogeologicznych. Kilku autorów używało jako wskaźnika C¹⁴. Wyniki nie były jednak zadowalające.

W tab. I podano dopuszczalne stężenia izotopów w wodzie. Przy badaniach należy tak dobierać izotopy promieniotwórcze i ich aktywności, aby nie przekroczyć dopuszczalnych stężeń, a zarazem aby stężenie izotopu w strefie pomiaru było wymierne. Dla oznaczenia średniego stężenia, powstającego w badanej strefie należy znać objętość, w jakiej została rozcieńczona ta ilość wskaźnika, która dotarła do danej strefy. Objętość, w której zostanie rozmieszczony wskaźnik w czasie przepływu, zależy od parametrów przepływu, tj. od szybkości, odległości, porowatości gruntu i początkowych warunków wprowadzenia wskaźnika do wody. Niejednorodność budowy geologicznej może wpłynąć na zatrzymanie części wskaźnika, a więc w miarę przebytej drogi stężenie jego ulegnie zmniejszeniu. Duży wpływ na rozmieszczanie wskaźnika podczas przepływu ma rodzaj otworu wpustowego. Z otworu niezarurowanego wskaźnik wypływa odrazu, natomiast w otworze zarurowanym może być zatrzymywany przez filtr, co obniża jego początkowe stężenie.

Średnie stężenie wskaźnika w strefie kontrolnej można obliczyć postępując się wzorem:

$$C_s = \frac{Aw e^{-0.693 \frac{t}{T}} - As}{W} K \quad (5)$$

gdzie:

- W — objętość, w której następuje rozmieszczenie wskaźnika,
K — współczynnik uwzględniający warunki wprowadzenia wskaźnika, pozostałe oznaczenia jak we wzorach (1) i (2).

Głównym warunkiem powodzenia prac nad badaniami przepływów jest, aby linie prądu wewnątrz warstwy wodonośnej przechodziły z otworu, do którego wskaźnik został wprowadzony, do otworu badawczego. Jeżeli przepływ ma być mierzony na odległościach powyżej 100 m nie można dokładnie

przewidzieć drogi wskaźnika i odpowiednio rozmieścić otworów pomiarowych.

Innym czynnikiem ograniczającym wykrywalność wskaźnika jest jego rozpraszanie na zewnątrz z wody, do której został on wprowadzony. Rozpraszanie to zachodzi zarówno w kierunku podłużnym, jak i poprzecznym do kierunku strumienia. Wskaźnik wprowadzony w danym punkcie ma tendencję do rozpraszania się wzdłuż strumienia w formie stożka, którego kąt zmienia się zależnie od uziarnienia, zazwyczaj jednak wynosi ok. 6°. Rozkład stężenia w płaszczyźnie umieszczonej na danej odległości od punktu wprowadzenia wskaźnika przedstawiony jest krzywą podobną do krzywej rozkładu normalnego Gaussa. Stężenie wzdłuż prostej poprowadzonej przez wierzchołek stożka jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości od wierzchołka.

Mimo iż dane doświadczalne istniejące w chwili obecnej nie dają możliwości wyboru lepszej metody teoretycznego podejścia do zagadnienia przewidywania dróg wskaźnika i jego rozproszenia, za wystarczająco słuszny w planowaniu eksperymentów można uznać wniosek wynikający z pracy Danela, iż wewnątrz swobodnie dyfundującej porcji wskaźnika stężenie w jej środku będzie maleć odwrotnie proporcjonalnie do trzeciej potęgi odległości, w miarę oddalania się porcji wskaźnika od punktu wprowadzenia.

LITERATURA

1. Borowczyk M. — Postępy techniki jądrowej 8, 1963.
2. Cameron F. J. — Biuletyn IAEA 2, 5, 28, 1963.
3. Danel — Proc. of Ankara Symposium on Arid Zone Hydrogeology, 99, 1953.
4. Feely H. W., Walton A., Bazan P. — The Potential Applications of Radioisotopes Techniques to Water Resources. Investigations and Utilization. Report NYO-9040.
5. Fleksier N. J. — Primimicje radioaktywnych induktorów dla issledowanija gruntowych potokow. Moskwa 1962.
6. Heemstra R. J. — Nucleonics, 1, 92, 1961.
7. Haley E., Nir A. — Use of Radioisotopes in studies of groundwater, Waterflow, Tel-Awiw 1960.
8. Kotowski A. — Zastosowanie metod radiometrycznych w hydrogeologii i geologii inżynierskiej. Referat na Radzie Techniczno-Ekonomicznej w Zjednoczeniu Przedsiębiorstw Hydrogeologicznych. 1963.
9. Krotowicz J. — Zastosowanie metod fizyki jądrowej w badaniach hydrogeologicznych. Referat na RTE w ZPH, 1963.
10. Scheidegger A. E. — J. Appl. Phys. 25, 994, 1954.
11. Poradnik Ochrony Radiogeologicznej C.L.O.R., 1960.
12. Symposium — Isotopes in Hydrology. IAEA, Wiedeń 1963.

SUMMARY

The article deals with the new method of using radioactive isotopes in hydrogeological investigations. Introduction of isotope technique into the hydrogeological investigations considerably simplifies the researches. Radioactive isotopes may be used in determining various hydrogeological parameters, i. a. in studies on direction and rate of ground water flow, in determining the supply zones, the ways of remote water circulation, the infiltration, the seepages of waters into the mines a. o.

When selecting the radioactive isotope there must be taken into considerations both the physical and chemical properties of an isotope, and the properties of an environment, in which the investigations are conducted.

РЕЗЮМЕ

Статья посвящена новому методу применения радиоактивных изотопов в гидрогеологических исследованиях. Внедрение изотопной техники в гидрогеологических исследованиях позволяет значительно их упростить. Радиоактивные изотопы могут применяться для определения многочисленных

гидрогеологических параметров, как направление и скорость миграции подземных вод, расположение зон питания, путей далекой циркуляции, инфильтрации, просачивания вод в шахты и т.п.

При выборе радиоактивного изотопа необходимо учитывать не только химические и физические свойства изотопа, но и свойства среды, в которой проводятся исследования.