

Interpretacja wieków trytowych wód podziemnych prostymi modelami matematycznymi

Andrzej Zuber*

Zmienne stężenia trytu w opadach powodują także zmienności w płytkich wodach podziemnych. W celu otrzymania wieków trytowych (czasów przepływu), te zmienności mogą być interpretowane za pomocą prostych modeli blokowych, jak np. model eksponencjalny, kombinowany model eksponencjalno-tłokowy i model dyspersyjny. W skałach porowych, odpowiednio dobrany model daje wiek trytowy, który jest równy średniemu czasowi przepływu wody w systemie. W skałach szczelinowych, cząsteczki wody z trytem dyfundują do wody stagnacyjnej w mikroporach bloków skalnych, dając w efekcie większe wieki niż czasy przepływu wody mobilnej w szczelinach. Dla znanej mikroporowości, można obliczyć współczynnik filtracji bez jakiegokolwiek znajomości parametrów szczelin.

Słowa kluczowe: wody podziemne, wieki trytowe, modele matematyczne, skały szczelinowe

Andrzej Zuber — Simple mathematical models for the interpretation of groundwater tritium ages. *Prz. Geol.*, 47: 571–573.

Summary. Variable tritium concentrations in meteoric waters also cause variations in shallow groundwaters. These variations can be interpreted in terms of tritium ages (residence times) by simple lumped-parameter models such as the exponential model, the combined piston flow and exponential model, and the dispersion model. For a properly chosen model, the tritium age is equal to the mean residence time of water in porous aquifers. In fissured aquifers, water molecules with tritium diffuse into the stagnant water in the microporous matrix, yielding ages greater than the residence times of mobile water in the fissures. For known matrix porosity, the hydraulic conductivity can be found without any knowledge of the fissure network.

Key words: groundwater, tritium ages, mathematical models, fissured rocks

Niniejsza praca zawiera zwięzłe omówienie podstaw fizycznych metody trytovej i prostych modeli (jedno- i dwukomorowych) używanych najczęściej do określania wieku wód z obserwacji zmian czasowych stężenia trytu w ujęciach wody. Modele te były zastosowane w wielu pracach, w tym do interpretacji wieków wód mineralnych Krynicy (Zuber i in., 1999).

Tryt (^3H), radioaktywny izotop wodoru o półokresie rozpadu 12,42 lat z emisją miękkiego promieniowania β^- , jest wykrywany zazwyczaj na poziomie $0,0 \pm 0,5$ T.U. (1 T.U., czyli jednostka trytovej, jest zdefiniowana jako 1 atom trytu na 10^{18} atomów wodoru normalnego). W okresie przedtermojądrowym stężenia trytu w opadach na naszej szerokości geograficznej wynosiły ok. 5 T.U., a więc tryt z tego okresu jest zazwyczaj niewykrywalny. Rozpoczęte w 1952 r. próbné wybuchy termojądrowe w atmosferze doprowadziły jednak do wysokich stężeń trytu w wodach opadowych. W latach 1963–1964 wynosiły one na półkuli północnej do ok. 6000 T.U., a po zaprzestaniu prób termojądrowych zaczęły spadać do obecnych wartości wynoszących 10–20 T.U. Wysokie i zmienne w czasie stężenia trytu w wodach opadowych dały możliwość określania wieku (czasu dopływu do danego miejsca) wód zasilanych po 1952 r., a w sprzyjających warunkach nawet wód o wiekach do ok. 1000 lat (w zależności od przyjętego modelu rozkładu czasowego linii dopływu wody). Tryt jest zaliczany do grupy idealnych znaczników wody, ponieważ jest on częścią składową jej molekuł (cząsteczki wody z trytem można zapisać jako $^3\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$, podczas gdy typowe mają zapis $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$).

Interpretacja danych znacznikowych dla systemów podziemnych zasilanych współczesnymi opadami oparta jest zazwyczaj na założeniu istnienia stałego przepływu wody. Zuber i in. (1986) wykazali, że jeżeli zmiany wydatku przepływu zachodzą w krótszych czasach niż średni czas przepływu trytu (wiek) to założenie stanu ustalonego

daje dobre wyniki nawet dla systemów o znacznej zmienności wydatku przepływu i objętości.

Dane trytowe są zazwyczaj interpretowane modelami opisanymi przez Małoszewskiego i Zuber (1982, 1996) przy zastosowaniu programu FLOWPC 2.3 (Małoszewski & Zuber, 1996). W modelach tych zakłada się, że dany system podziemny jest reprezentowany przez jedną, lub dwie, szeregowo połączone komory (ryc. 1). Zmiany czasowe znacznika na wejściu do systemu muszą być znane, jest to tzw. funkcja wejścia, $C_{in}(t)$, a zmiany czasowe stężenia na wyjściu (np. źródło lub otwór eksploatacyjny) muszą być mierzone, $C_{out}(t)$. Dopasowując obliczone stężenia trytu do wartości mierzonych na wyjściu, można znaleźć typ modelu i wartości jego parametrów, będące przydatne do interpretacji hydrogeologicznej. Jest to tzw. szukanie rozwiązania odwrotnego. Pomimo niezwykle daleko idących uproszczeń, stosowane modele pozwalają często otrzymywać zadziwiająco dobre rezultaty, potwierdzone w przypadkach w których wieki trytowe można porównać z czasami przepływów uzyskanymi innymi metodami. Najczęściej są stosowane: model eksponencjalny (EM), w którym założono wykładniczy rozkład czasów przepływu przez system podziemny; model kombinowany (EPM), będący szeregowym połączeniem modelu eksponencjalnego (EM) i tłokowego (PFM) w dowolnej kolejności, w którym część tłokowa odpowiada części systemu z liniami przepływu o tej samej prędkości i długości z zaniedbywalnie niską dyspersją; i model dyspersyjny (DM), w którym założono rozkład czasów przepływu opisany rozwiązaniem jednowymiarowego równania dyspersji. Dla EM rozkład czasu przepływów dany jest funkcją $g(t) = (1/t)\exp(-t/t)$. Pozostałe modele mają nieco bardziej skomplikowane funkcje (Małoszewski & Zuber, 1982; Zuber, 1986). Funkcje te opisują rozkład czasowy stężenia znacznika jaki byłby mierzony w punkcie obserwacji (otwór pompowy, źródło) w wyniku impulsowej (krótkotrwałej) iniekcji na całym obszarze zasilania. Taki eksperyment nie jest możliwy do przeprowadzenia, a więc stosuje się funk-

*Instytut Fizyki Jądrowej, Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

cje wyprowadzone teoretycznie i sprawdzone doświadczalnie w innych dziedzinach wiedzy.

We wszystkich modelach występuje parametr będący średnim czasem przepływu znacznika (t_w), zwany także wiekiem. Natomiast wiek wody zdefiniowany jest jako $t_w = V_w/Q$, gdzie V_w jest objętością wody w systemie, a Q jest wydatkiem przepływu przez część systemu podlegającą pomiarowi. Dla ośrodków porowych, bez stref stagnacyjnych i o ciągłym przepływie wody, wiek znacznika równy jest wiekowi wody, jeżeli model interpretacyjny został dobrany odpowiednio do charakteru przepływu. Jest to bardzo istotny warunek, o którym większość autorów często zapomina. Oznacza to, że np. wiek znacznikowy obliczony według modelu tłokowego nie jest poprawny, jeżeli przepływ wody ma charakter eksponencjalny. I na odwrót, wiek znacznikowy obliczony modelem typu EM nie jest poprawny, jeżeli przepływu ma charakter tłokowy.

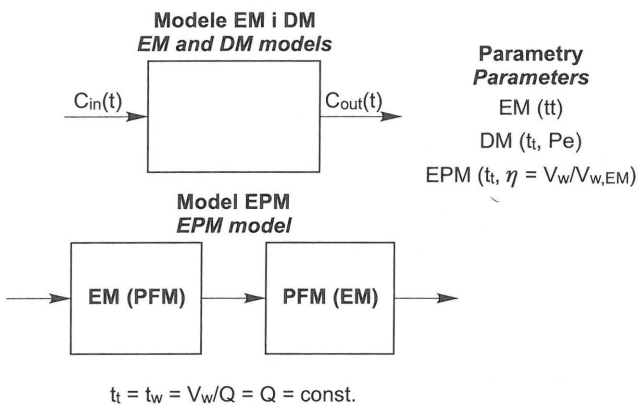
W przypadku EM muszą istnieć linie przepływu o zarówno nieskończenie krótkich jak i nieskończenie długich czasach przepływu (np. ryc. 2). W praktyce model ten dobrze opisuje czasy dopływu dla źródeł i otworów eksploatacyjnych w systemach o swobodnym i płytkim zwierciadle wody. Mimo, że średni czas przepływu (t_w) jest jedynym parametrem, czasy przepływu znacznika wzdłuż wszystkich strug wody są jednoznacznie opisane funkcją przejścia, czyli funkcją $g(t)$. Nieco bardziej wszechstronnym jest model typu EPM (ryc. 3), w którym część tłokowa odpowiada albo infiltracji przez stre-

fę nienasyconą, albo/i przepływowi przez strefę o napiętym zwierciadle wody. W modelu tym występuje jednak dodatkowy dopasowywany (szukany) parametr oznaczony jako: $\eta = V_w/V_{w,EM}$ (ryc. 1 i 3). Jest to stosunek całkowitej objętości wody w systemie (V_w) do objętości opisanej modelem eksponencjalnym ($V_{w,EM}$). Istnienie dodatkowego parametru wprowadzie rozszerza możliwości interpretacyjne, ale często utrudnia jednoznaczną interpretację, gdyż przy zwiększonej liczbie szukanych parametrów można równie dobrze dopasować różne ich wartości (np. Ciężkowski & Zuber, 1996). W modelu dyspersyjnym (ryc. 4) występuje pozorny parametr dyspersyjny (w cytowanych pracach oznaczony jako $D/vx = Pe^{-1}$). Ten model jest najbardziej wszechstronny, ma jednak podobne ograniczenia jak EPM, a wartość parametru dyspersyjnego nie ma tak jednoznacznej interpretacji jak parametr η . Należy zauważyć, że w odróżnieniu od modelu tłokowego, żaden z rozpatrywanych modeli nie wykazuje maksymalnego prawdopodobieństwa przepływu (dla iniekcji impulsowej byłoby to maksymalne stężenie znacznika) w czasie równym średniemu czasowi przepływu.

Praktyka interpretacyjna pokazała niezbędność stosowania jeszcze jednego dodatkowego parametru, opisującego obecność domieszki wody bez trytu (lub w przybliżeniu o stałym stężeniu trytu). Parametr ten, oznaczony jako β , przedstawia stosunek wydatku dopływu wody starszej (bez trytu, lub ze stałym stężeniem) do całkowitego wydatku.

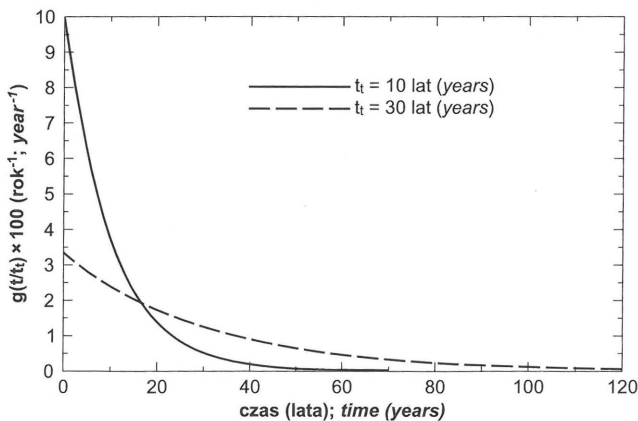
Interpretacji nie należy kończyć na uzyskaniu modelu z dobrym dopasowaniem, gdyż inny model może dawać równie dobre dopasowanie (w programie FLOWPC podawana jest dokładność uzyskanego dopasowania). Należy przy tym pamiętać, że przy małej liczbie pomiarów „dobroć” dopasowania jest często złudna. W przypadku uzyskania kilku modeli z dobrym dopasowaniem, ale dających różne wartości parametrów systemu wodonośnego, należy dokonać ostatecznej selekcji modelu wykorzystując inne informacje (np. skład izotopowy może pokazywać położenie obszaru zasilania na wysokości wykluczającej niektóre modele).

Funkcję wejścia, tzn. zmiany czasowe stężeń trytu w wodzie infiltrującej na obszarze zasilania od czasu zaistnienia zmian stężenia trytu w opadach (tzn. od 1952 r.), aż do momentu ostatniego pomiaru w miejscu obserwacji, wyznacza się w sposób przybliżony z miesięcznych sum opadów z najbliższej stacji meteorologicznej i ze stężeń trytu mierzonych w najbliższej stacji obserwacyjnej (dla Polski jest to Kraków). Dla znaczących wartości wieków (np. ≥ 20 lat) wymóg bliskiej stacji meteorologicznej nie



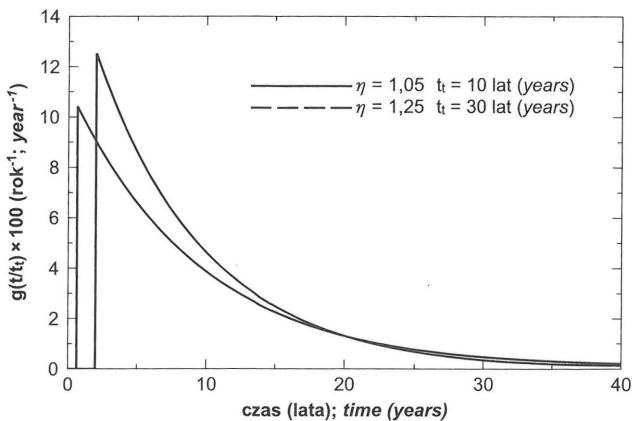
Ryc. 1. Schematyczne przedstawienie prostych modeli jedno- i dwukomorowych

Fig. 1. Schematic presentation of simple single and double cell models



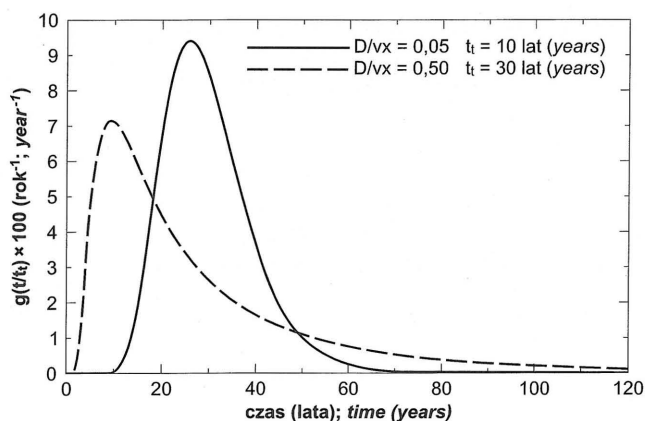
Ryc. 2. Przykłady funkcji czasów przepływu dla modelu eksponencjalnego (EM)

Fig. 2. Examples of residence time distribution function for the exponential model (EM)



Ryc. 3. Przykłady funkcji czasów przepływu dla kombinowanego modelu (EPM)

Fig. 3. Examples of the residence time distribution function for the combined model (EPM)



Ryc. 4. Przykłady funkcji czasów przepływu dla modelu dyspersyjnego (DM) z najczęściej spotykanymi skrajnymi wartościami parametru dyspersyjnego ($D/vx = Pe^{-1}$)

Fig. 4. Examples of the residence time distribution function for the dispersive model (DM) with the most common extreme values of the dispersion parameter ($D/vx = Pe^{-1}$)

jest już specjalnie konieczny. Procedura obliczania funkcji wejścia jest opisana w pracach Grabczaka i in. (1984), Zuber (1986) oraz Małoszewskiego i Zuber (1996).

Wiekі znacznikowe w przypadku użycia adekwatnego modelu są interpretowane w zależności od sytuacji i potrzeb. Bezpośrednia interpretacja wieku dostarcza informacji o odporności danego systemu na zanieczyszczenia antropogeniczne. W przypadku znanego wydatku wypływu z systemu (np. ze źródła) można obliczyć objętość wody ($V_w = Qt_t$) tej części danego systemu wodonośnego, która zasila to źródło. Dla skał porowych, znając porowatość (n), można także oszacować objętość całkowitą systemu ($V_r = V_w/n$). W przypadku znanej (oszacowanej) objętości i nieznanego Q (np. pomiary trytu w odwiertach eksploatujących jedynie część wody z systemu, można z wartości wieku oszacować wielkość zasilania (w założeniu równej wartości Q).

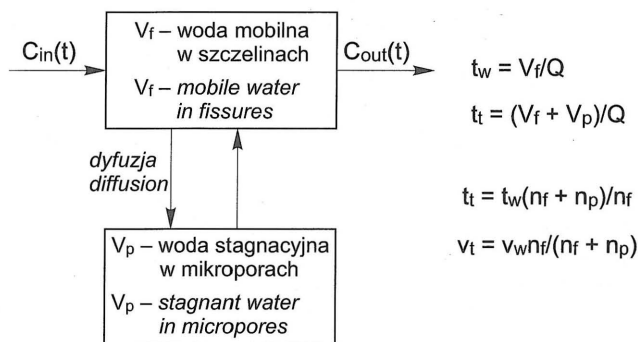
Dla znanej średniej odległości (x) od obszaru zasilania można określić prędkość rzeczywistą przepływu wody ($v_w = x/t_w = x/t_t$) oraz prędkość filtracji ($v_f = nv_w$), co pozwala obliczyć regionalną wartość współczynnika filtracji (k), przy znanym średnim gradiencie hydraulicznym (i).

Jednak dla skał szczelinowatych i krasowych, wskutek wymiany dyfuzyjnej znacznika między wodą mobilną w szczelinach i wodą stagnacyjną w porach, wiek trytowe nie reprezentuje wody mobilnej w systemie, lecz całkowitą objętość wody, tzn. także objętość wody stagnacyjnej (lub w przybliżeniu stagnacyjnej) znajdującej się w porach bloków skalnych, gdyż $n = n_p + n_f$, gdzie n_p jest porowatością bloków skalnych, będącą zazwyczaj dużo większą od współczynnika szczelinowatości, n_f . Wskutek tego, wieki trytowe (t_t) są zazwyczaj wielokrotnie większe niż wieki wody (t_w) oczekiwane z danych hydrogeologicznych, jak to pokazano schematycznie na ryc. 5. Szczegółowe przykłady zastosowania koncepcji wieku znacznika w celu określania parametrów hydrogeologicznych są zawarte w pracy Zuber i Motyki (1994) oraz Zuber i Ciężkowskiego (1997). Przypomnijmy jedynie, że z prawa Darcy'ego i związku między średnią prędkością przepływu znacznika (v_t) i wody (v_w) pokazanego na ryc. 5, wynika:

$$k = (n_p + n_f)v_f/i,$$

a dla $n_p \gg n_f$ otrzymuje się uproszczoną i niezwykle praktyczną postać:

$$k \cong n_p v_f/i = n_p x/it_t.$$



Ryc. 5. Schematyczne przedstawienie koncepcji przepływu rozтворów przez skały szczelinowate z opóźnieniem w stosunku do ruchu masy wody (strumienia) spowodowanym przez wymianę dyfuzyjną między wodą mobilną w szczelinach i wodą stagnacyjną w mikroporach

Fig. 5. Schematic presentation of the solute flow through fissured rocks with the delay in the respect to mobile water flux caused by diffusion exchange between the mobile water in fissures and stagnant water in the micropores

Znaczenie tego wzoru wynika z faktu, że n_p jest łatwo mierzalne na próbkach skał, lub w ostateczności może być oszacowane w oparciu o dane literaturowe, podczas gdy n_f (występujące we wzorze Darcy'ego dla skał szczelinowatych) jest zazwyczaj niemierzalne. Znacząc więc wiek znacznika (t_t), można dla skał szczelinowatych określić regionalną wartość k , lub odwrotnie, znając k (np. z próbnych pompowań) można przewidzieć średnią prędkość przepływu polutanta nie ulegającego sorpcji (v_t), bez jakiegokolwiek znajomości parametrów szczelin. Tak więc, zwłaszcza dla skał szczelinowatych, metody znacznikowe dostarczają informacji, które praktycznie są nieosiągalne przy pomocy innych metod.

Literatura

- CIĘŻKOWSKI W. & ZUBER A. 1996 — Niepewności w określaniu wieku wód metodą trytową na przykładzie wód leczniczych Sudetów. Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski. Dolnośląskie Wyd. Eduk., Wrocław: 255–262.
- GRABCZAK J., MAŁOSZEWSKI P., RÓŻAŃSKI K. & ZUBER A. 1984 — Estimation of the tritium input function with the aid of stable isotopes. *Catena*, 11: 105–114.
- MAŁOSZEWSKI P. & ZUBER A. 1982 — Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers I. Models and their applicability. *J. Hydrol.*, 57: 207–231.
- MAŁOSZEWSKI P. & ZUBER A. 1993 — Principles and practice of calibration and validation of mathematical models for the interpretation of environmental tracer data in aquifers. *Adv. Water Resour.*, 16: 173–190.
- MAŁOSZEWSKI P. & ZUBER A. 1996 — Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data. *Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrology*. IAEA-TECDOC-910, IAEA, Vienna: 9–58.
- ZUBER A. 1986 — Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. [W:] *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, vol. 2, part B, P. Fritz, J.Ch. Fontes (eds.). Elsevier, Amsterdam: 1–59.
- ZUBER A. & MOTYKA J. 1994 — Matrix porosity as the most important parameter of fissured rocks for solute transport at large scales. *J. Hydrol.*, 158: 19–46.
- ZUBER A. & CIĘŻKOWSKI W. 1997 — Regional parameters of some fissured aquifers in the Bohemian Massif obtained from environmental tracer data. *Acta Univ. Wratisl.*, 2052, Hydrogeology, 181–197.
- ZUBER A., MAŁOSZEWSKI P., STICHLER W. & HERRMANN A. 1986 — Tracer relations in variable flow. *5th International Symposium on Underground Water Tracing*. Inst. of Geology and Mineral Exploration, Athens: 355–360.
- ZUBER A., CIĘŻKOWSKI W., GRABCZAK J. & DULIŃSKI M. 1999 — Wiek i położenie obszarów zasilania wód mineralnych Krynicy oszacowane ze zmian czasowych stężeń trytu oraz wartości $\delta^{18}O$ i δD . *Prz. Geol.*, 47: 574–583.