



Średni czas pobytu wód podziemnych w zlewniach Wisły i Narwi na podstawie oznaczeń trytu

Zbigniew Nowicki¹, Paweł M. Leśniak¹, Andrzej Wilamowski¹



Z. Nowicki



P.M. Leśniak



A. Wilamowski

Mean residence time of groundwater in the Vistula and Narew basins on the basis of tritium measurements. *Prz. Geol.*, 64: 545–551.

A b s t r a c t. An issue of mean residence time (MRT) evaluation, i.e. the period of time from rainfall until drainage of groundwater by rivers (Danube River Basin, Vistula River Basin and Narew River Basin), is discussed. A simple method of evaluating the groundwater MRT for the Danube River Basin based on tritium data is introduced. It has been confirmed that the historical tritium level in the rivers, being higher than in precipitation, has its end and is reversed, opening a new pathway in understanding the surface-groundwater interaction and specifically in evaluating MRT of groundwater. The authors have defined a separate

notification for mean residence time of the whole water in the basin (τ) and mean residence time for groundwater in the basin (τ_{wp}). Based on the tritium study the obtained τ values are 6.5 and 5.7 years for the Vistula River Basin (VRB) and the Narew River Basin (NRB), respectively. In turn, the obtained τ_{wp} values are 8.0 and 6.0 years, respectively. NRB is a lowland plain and a morphologically, geologically and hydrogeologically uniform basin. The obtained τ_{wp} of groundwater is thus representative for the whole basin. Instead in morphologically non uniform VRB basin groundwater τ_{wp} is a generalized value, i.e. averaged over contributed parts of the basin.

Keywords: tritium, mean residence time, Vistula River Basin, Narew River Basin, Danube River Basin

Ocena zasobów wodnych stanowi jeden z najważniejszych współczesnych problemów przyrodniczych w dynamicznie zmieniającym się klimacie na Ziemi i jest niezbędna dla zapewnienia właściwego dostępu ludności do wód pitnych. Dlatego każda praca przyczyniająca się do poznania rzeczywistej skali czasowej obiegu wody w przyrodzie jest bardzo ważnym krokiem w zrozumieniu dynamiki tego procesu, a w przypadku hydrogeologii, również do lepszego poznania szybkości krążenia wód podziemnych w zlewniach i tworzenia się zasobów odnawialnych.

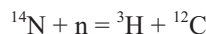
W ostatnich latach ukazało się szereg publikacji, w których są przedstawiane wyniki modelowania dotyczące średniego czasu pobytu (ang. *mean residence time* – MRT) wód podziemnych w zlewniach rzecznych. Dotyczą one głównie rzek Stanów Zjednoczonych, a w przypadku Europy szczególnie dużo miejsca poświęcono zlewni Dunaju. Podstawą modelowania były długoczasowe ciągi obserwacyjne zmian stężeń trytu w rzekach i w opadach atmosferycznych.

W artykule omówiono stosowane do tej pory metody oceny średniego czasu pobytu (MRT) wód podziemnych w zlewni oraz przedstawiono autorską, uproszczoną metodę, która została zastosowana w zlewni Dunaju. Wskazano również na nowe możliwości metodyczne wyznaczania średniego czasu pobytu wód podziemnych w zlewniach, które pojawiły się w ostatnich latach oraz przedstawiono wyniki badań trytowych w zlewniach Wisły i Narwi.

TRYT W OBIEGU HYDROLOGICZNYM

W warunkach naturalnych podstawowym źródłem pochodzenia trytu na Ziemi jest reakcja jąder azotu ^{14}N z neutro-

nami termicznymi zachodząca w atmosferze (Libby, 1946) w myśl równania:



gdzie:

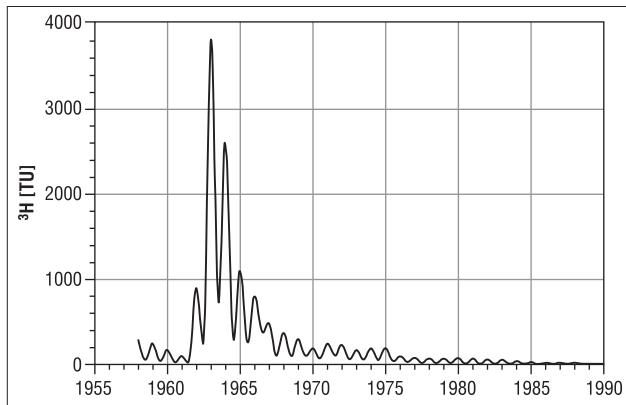
n – liczba neutronów,

przy czym czas półrozpadu trytu wynosi $4500 + 8$ dni (Lucas & Unterwiesgen, 2000).

W wyniku produkcji kosmicznej stężenie trytu w opadach atmosferycznych na półkuli północnej przed erą prób z bronią jądrową, a więc do 1952 r., wynosiło najczęściej ok. 1–7 TU (*Tritium Units*), przy czym ekstremalne wartości oznaczonych stężeń – od 0,1 do 40,0 TU – były zależne od lokalizacji miejsca poboru próbek. Jednocześnie stwierdzono, że stężenie trytu w opadach było zmienne w przestrzeni i w czasie – wyraźnie wzrastało nad kontynentami, zwiększało się również wraz ze wzrostem szerokości geograficznej, natomiast zmniejszało się nad oceanami (Kaufmann & Libby, 1954). W ciągu roku najwyższe stężenia trytu w opadach obserwowano wiosną i latem – minimum zawartości ^3H występowało w sezonie jesienno-zimowym (tzw. efekt sezonowy). W Polsce średnie stężenie trytu w tym czasie w opadach wynosiło najprawdopodobniej ok. 5–10 TU.

Naturalny rozkład stężeń trytu na Ziemi został bardzo istotnie zmieniony w wyniku działalności człowieka (tzw. produkcja antropogeniczna). W okresie prowadzenia prób z bronią jądrową i termojądrową (1953–1963), a zwłaszcza w latach 1962–1963 w wyniku próbnych wybuchów, przeprowadzonych na dużych wysokościach, do atmosfery zostały wprowadzone ogromne ilości trytu (ryc. 1) szacowane

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; zbigniew.nowicki@pgi.gov.pl, pawel.lesniak@pgi.gov.pl, andrzej.wilamowski@pgi.gov.pl.



Ryc. 1. Wyglądzona krzywa pokazująca średnie stężenia trytu w opadach atmosferycznych nad powierzchnią kontynentów półkuli północnej (Calmon & Garnier-Laplace, 2006)

Fig. 1. Smooth curve showing the average tritium concentrations in precipitation over the continental surface in the Northern Hemisphere (Calmon & Garnier-Laplace, 2006)

na ok. 400 kg (Ostlund & Fine, 1979) lub 400–600 kg (Michel, 1992). W pojedynczych pomiarach stwierdzano stężenia trytu w opadach dochodzące do 10 000 TU.

Dopływ dużej ilości trytu do hydrosfery (ryc. 1) głównie w latach 1962–1963 stworzył dodatkowe możliwości wykorzystania oznaczeń ^3H w badaniach hydrogeologicznych. Impulsowe zmiany stężenia trytu w opadach atmosferycznych w wielu systemach wodonośnych znalazły swoje odbicie w postaci krzywych zmian stężeń ^3H na drodze przepływu wód podziemnych od strefy zasilania. W interpretacji tych krzywych stosuje się modele wynikające z teorii transportu znaczników idealnych, co oznacza, że obliczony czas jest najbliższy rzeczywistemu czasowi przepływu wody w warstwach wodonośnych. W celu określenia wieku wód podziemnych w warstwach wodonośnych zbudowano i rozwinięto szereg modeli matematycznych, polegających na badaniu zbieżności zmierzoney zawartości trytu (także innych wskaźników) z wartościami wynikającymi z modeli. W modelach tych (Małozzewski & Zuber, 1982) użyto rozkładów opisujących przepływ typu *piston-flow*, mieszanina wykładniczego i innych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego z możliwością korekcji parametrów założonych. Były one wykorzystywane nie tylko do datowania wód podziemnych, ale również wyznaczania czasów dopływów wód do kopalń, szacowania stopnia zagrożenia wód podziemnych zanieczyszczeniami antropogenicznymi i wielu innych celów.

MODELE OBLICZENIOWE DLA ZLEWNI

Zmiany stężeń trytu w rzekach są odzwierciedleniem zmian stężeń ^3H w opadach atmosferycznych z opóźnieniem, wynikającym z czasu pobytu wody w hydrogeologicznych systemach strefy intensywnej wymiany w obrębie zlewni. Od połowy lat 60. XX w., a więc po przejściu piku trytu w opadach atmosferycznych, średnie roczne stężenia ^3H w rzekach były wyższe niż średnie roczne w opadach. Jest to oczywiste, ponieważ system hydrogeologiczny w zlewni jest systemem opóźniającym przepływ w układzie opad–infiltracja–przepływ podziemny–drenaż–odpływ rzeczny w stosunku do układu opad–spływ powierzchniowy–odpływ rzeczny. Opóźnienie to powoduje przesunięcie w prawo krzywej opisującej zmiany stężeń trytu w funkcji czasu, w porównaniu z krzywą zmian stężeń ^3H w opadach.

Pozwala to na oszacowanie średniego czasu pobytu wody w warstwie wodonośnej (zlewni), przy czym identyfikacja warstw, przez które zachodzi przepływ nie musi być dokładna i jednoznaczna. Jako pierwsi na takie możliwości określenia średniego czasu pobytu (MRT) zwrócili uwagę Michel (1992) oraz Rank i in. (1998). Warto tu podkreślić, że docenienie wartości oznaczeń trytu w rzekach przyszło dość późno, bo dopiero w latach 2000 IAEA (International Atomic Energy Agency) zorganizowała, na podobieństwo bazy GNIP (Global Network of Isotope in Precipitation), bazę danych zbierającą składy izotopowe ważniejszych rzek świata GNIR (Global Network of Isotope in River) (Vitvar i in., 2007; Aggarwal i in., 2010).

Model Michela (1992) dla zlewni jest oparty na bilansie trytu, w którym autor przyjął, że wody w zlewni są dwuskładnikowe, w myśl zapisu:

$$C_0 = nC_r + mC_g$$

gdzie:

C_0 – stężenie trytu w wodach odpływających (w rzece),
 C_r – stężenie trytu w wodach systemu hydrogeologicznego młodszych niż 1 rok,
 C_g – stężenie trytu w wodach systemu hydrogeologicznego starszych niż 1 rok,
 n, m – udziały poszczególnych typów wód w systemie, przy czym $n + m = 1$.

Należy podkreślić, że w modelu Michela średni czas pobytu dotyczy tylko wód podziemnych starszych niż jeden rok, natomiast wody podziemne młodsze (o wieku poniżej 1 roku) są grupowane razem z wodami ze spływu powierzchniowego. Z hydrogeologicznego punktu widzenia budzi to zastrzeżenia, ponieważ np. dla zlewni o szybkich przepływach i niewielkich możliwościach retencyjnych uzyskana wartość MRT może znacznie odbiegać od rzeczywistej wartości średniego czasu pobytu wód podziemnych w zlewni.

Dla tak opisanego systemu hydrogeologicznego C_g będzie równe średniemu stężeniu trytu w tym systemie, przy czym zmiany w czasie wartości C_g można przedstawić jako:

$$\frac{dC_g}{dt} = -\lambda C_g - k(C_g - C_p)$$

gdzie:

t – średni czas pobytu wód podziemnych starszych niż 1 rok w zlewni (= MRT),
 λ – stała rozpadu trytu,
 k – odwrotność czasu pobytu (t) wód podziemnych starszych niż 1 rok w systemie hydrogeologicznym ($k = 1/t$)
 C_p – średnie ważone stężenie trytu w kolejnych latach, równoważne z C_r .

Dodatkowe założenia do modelu były następujące:

- system hydrogeologiczny spełnia warunki modelu dobrego mieszania;
- opady są jedynym źródłem występowania trytu w systemie;
- rozpad promieniotwórczy jest jedyną przyczyną zmniejszania się stężeń trytu w systemie;
- wartość k odnosi się do dopływu (opady) i odpływu (rzeka);

– zmiany objętości systemu w czasie wynikające ze zmian wielkości opadów są relatywnie małe w stosunku do całkowitej objętości systemu.

Powyższy model został wykorzystany do wyznaczenia wielu krzywych zmian stężeń trytu w odpływie (rzece) dla różnych wartości k , n oraz m . Porównanie stopnia dopasowania uzyskanych krzywych teoretycznych z krzywą rzeczywistą zmian stężeń trytu w rzece metodą regresji liniowej pozwoliło na wyznaczenie wartości k , n oraz m (na podstawie najwyższych współczynników korelacji r). Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Model Michela został również wykorzystany do oszacowania średniego czasu pobytu wód podziemnych (MRT) w systemie hydrogeologicznym górnej części zlewni Dunaju (Upper Danube Basin) powyżej Wiednia (Rank i in., 1998, 2000, 2012, 2014; Rank & Papesch, 2010). Fragment ten obejmuje obszar ok. 103 000 km², tj. 12,6% powierzchni całej zlewni. Największe dopływy Dunaju w tym obszarze dorzecza, np. Inn, są zlewniami górskimi i wysokogórskimi. Wyniki tego modelowania (Rank i in., 2014) przedstawiono na rycinie 2 (wersja oryginalna).

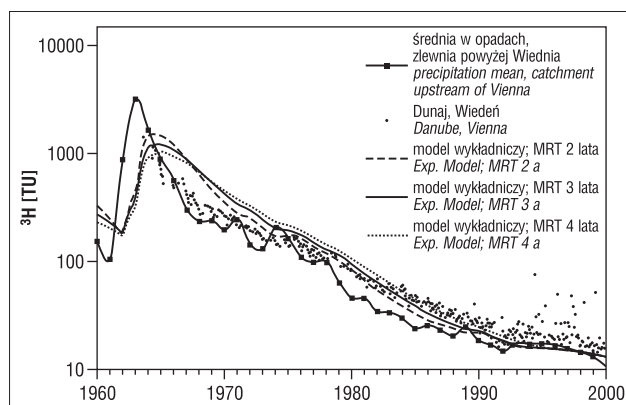
Rank i in. (2014) stwierdzili, że najlepsze dopasowanie do krzywej zmian zawartości trytu w Dunaju wykazuje krzywa odpowiadająca średniemu czasowi przebywania wód podziemnych w zlewni wynoszącym 3 lata, zaznaczając jednocześnie, że jest to metoda przybliżona. W opinii autorów artykułu, lepsze dopasowanie wykazuje krzywa odpowiadająca MRT = 2 lata, np. ze względu na jej bliższe usytuowanie względem krzywej zmian stężeń trytu obserwowanej w wodach Dunaju.

Dysponując niemal pełnymi danymi (krzywymi zmian) dotyczącymi zawartości trytu w opadach i w rzece, w obserwacjach długoczasowych obejmującymi okres od początku lat 60. aż do chwili obecnej (tak jak w przypadku Dunaju), można wyznaczyć średni czas pobytu wód w zlewni bardziej prostymi metodami, które nie wymagają dość żmudnych procedur przeliczeniowych wynikających z modelowania. Jak wiadomo zmiany stężeń trytu w rzekach są odzwierciedleniem zmian jego zawartości w opadach, ale z opóźnieniem wynikającym z czasu przebywania tych wód w strefie aktywnej (intensywnej) wymiany wód podziemnych w obrębie zlewni. Wyznaczając zatem to opóźnienie, które jest widoczne na wykresach jako przesunięcie jednej krzywej w stosunku do drugiej, można określić średni czas pobytu wód w systemie hydrogeologicznym zlewni. Jedną z metod powszechnie stosowaną w badaniach znacznikowych opiera się na założeniu, że średni czas przejścia znacznika najlepiej odzwierciedla środek ciężkości krzywej zmian.

Tab. 1. Średni czas pobytu (t) wód podziemnych w zlewniach rzek USA

Table 1. Mean residence time (t) of groundwater in river basins of the USA

Rzeka River	n	m	t [lata] [years]	r
Colorado	0,40	0,60	14,3	0,971
Kissimmee	0,94	0,06	2,5	0,983
Mississippi	0,64	0,36	10,0	0,974
Neuse	0,73	0,27	11,1	0,967
Potomac	0,46	0,54	20,0	0,979
Sacramento	0,35	0,65	10,0	0,972
Susquehanna	0,80	0,20	10,0	0,989



Ryc. 2. Porównanie zmierzonych i modelowanych stężeń trytu w wodach Dunaju w Wiedniu (1960–2000) przy zastosowaniu jednoskrzynkowego modelu wykładniczego. Stężenia trytu w opadach są wartościami średnimi ważonymi z 10 stacji Austriackiej Sieci Izotopów w Opadach (ANIP)

Fig. 2. Comparison of measured and modelled tritium contents of the Danube River water at Vienna (1960–2000) using the one-box exponential model. Precipitation tritium data are average values of 10 stations of the Austrian Network of Isotopes in Precipitation (ANIP)

Można zatem zapisać, że średni czas pobytu wód w zlewni jest równy różnicy położenia środków ciężkości krzywych liczonych na osi czasu, w myśl równania:

$$t_w = t_R - t_O = \frac{\sum (C_{1..n} \cdot t_{1..n})}{\sum C_{1..n}} - \frac{\sum (c_{1..n} \cdot t_{1..n})}{\sum c_{1..n}}$$

gdzie:

t_w – średni czas pobytu wody w zlewni,

t_R – środek ciężkości krzywej zmian stężeń trytu w rzece [czas],

t_O – środek ciężkości krzywej zmian stężeń trytu w opadach [czas],

$C_{1..n}$ – stężenie trytu w rzece w kolejnych punktach od 1 do n (średnie roczne),

$c_{1..n}$ – stężenie trytu w opadach w kolejnych punktach od 1 do n (średnie roczne),

$t_{1..n}$ – kolejne punkty czasowe stężenia trytu w opadach i rzece,

n – punkty czasowe w stosunku do układu współrzędnych $C=f(t)$, w którym początek układu jest położony w dowolnym punkcie przed początkiem krzywej dotyczącej zmian stężenia trytu w opadach.

Należy zaznaczyć, że dla krótkich czasów przepływu wpływ rozpadu promieniotwórczego jest do pominięcia.

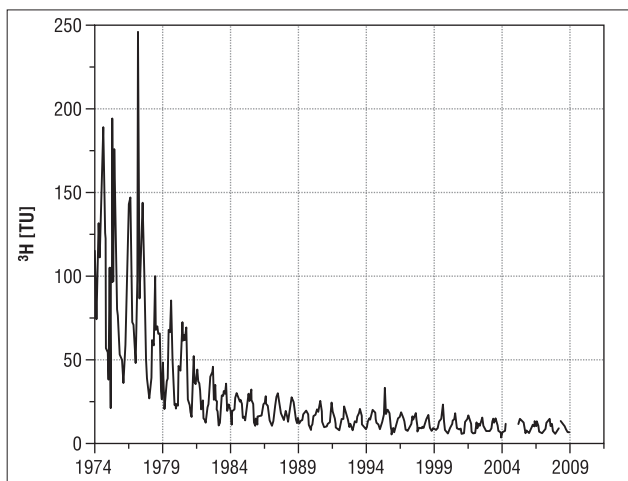
Stosując powyżej opisaną metodę, autorzy niniejszego artykułu obliczyli, że średni czas pobytu wód w zlewni górnego Dunaju do punktu obserwacyjnego w Wiedniu wynosi ok. 2 lat. Na podkreślenie zasługuje fakt, że mimo zastosowania zupełnie odmiennych sposobów, uzyskano niemal identyczny wynik.

TRYT W OPADACH NA TERENIE POLSKI

Systematyczne badania zawartości trytu w opadach na obszarze Polski są praktycznie prowadzone nieprzerwanie od 1974 r. w stacji meteorologicznej w Woli Justowskiej (okolice Krakowa), przy czym pomiary są wykonywane w Laboratorium Wydziału Fizyki i Informatyki AGH. Wyniki tych oznaczeń wraz z miesięcznymi sumami wielkości

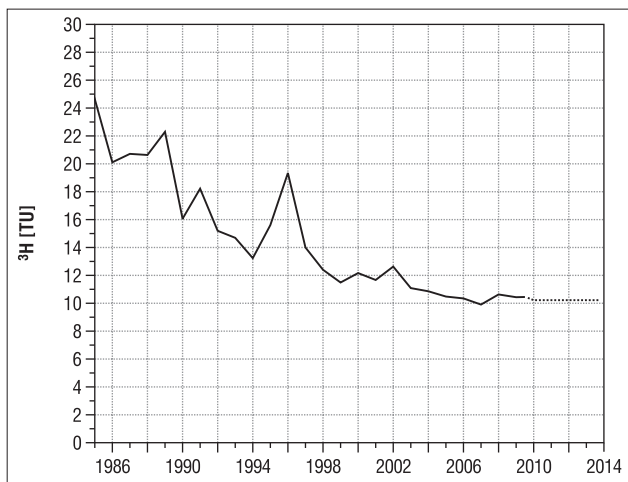
opadów są dostępne w bazie danych GNIP IAEA. Na rycinie 3 przedstawiono je w postaci zmian stężeń trytu w cyklach miesięcznych.

Z wykresu (ryc. 3) wynika, że od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku mamy do czynienia ze stopniowym, lecz wyraźnym, wygaszaniem „krzywej trytowej” w opadach atmosferycznych, obrazującej efekt prób nuklearnych prowadzonych głównie na początku lat 60. XX w. Dane po roku 2004 (przedstawione na ryc. 4 jako średnie roczne ważone wielkością opadów), których przebieg układa się niemal w poziomą linię prostą, świadczą o resztkowym wymywaniu z atmosfery nadmiaru trytu uwolnionego podczas prób nuklearnych.



Ryc. 3. Zmiany stężeń trytu w opadach atmosferycznych na stacji Wola Justowska k. Krakowa w latach 1974–2009 na podstawie bazy GNIP (Global Network of Isotope in Precipitation, IAEA)

Fig. 3. Changes of tritium contents in precipitation at the Wola Justowska near Kraków station (1974–2009) on the basis of GNIP (Global Network of Isotope in Precipitation, IAEA)



Ryc. 4. Zmiany średnich rocznych (ważonych opadami) stężeń trytu w opadach atmosferycznych na stacji Wola Justowska k. Krakowa w latach 1986–2014. Linia ciągła – średnie roczne ważone stężenia trytu przeliczone na podstawie bazy GNIP, linia kropkowa – dane wg Dulińskiego i in. (2015)

Fig. 4. Changes of weighted average (years) tritium concentrations in precipitation at the Wola Justowska near Kraków station in the years 1986–2014. Continuous line is for year weighted average tritium concentrations from GNIP base, dotted line are from recent data of Duliński et al. (2015)

MODEL PEŁNEGO MIESZANIA

Rozważając możliwości wyznaczania wartości MRT w zlewniach, autorzy zwrócili uwagę na zmianę do jakiej doszło w ostatnich kilkunastu latach, bardzo istotnej z przyrodniczego punktu widzenia i niezwykle atrakcyjnej dla badaczy zajmujących się obiegiem wód w cyklu hydrologicznym. Polega ona na niemal całkowitym zakończeniu procesu wymywania nadmiaru trytu „bombowego” w atmosferze, co spowodowało, że w rzekach obserwujemy obecnie niższe stężenia trytu niż w opadach. Stwarza to całkowicie nowe możliwości, i na znacznie szerszą skalę niż dotychczas, wyznaczania średniego czasu pobytu wód w zlewniach oraz innych badań hydrodynamicznych w zlewniach rzecznych.

Poziomy lub niemal poziomy przebieg krzywej zmian stężeń trytu w opadach przy jednoczesnym zachowaniu podstawowych warunków, w tym:

$$C_{rz} < C_{op} \text{ oraz } C_{rz} - \text{stałe w czasie lub mało zmienne}$$

gdzie:

C_{rz} – średnie roczne stężenie trytu w rzece,

C_{op} – średnie roczne (ważone wielkością opadów) stężenie trytu w opadach,

stwarza nowe możliwości interpretacyjne dla badań trytowych w rzekach i pozwala zastosować metodę odpowiadającą modelowi znacznikowemu dla iniekcji ze stałą wydajnością w czasie do systemu o nieznanymi parametrach hydrogeologicznych. Dodatkowe założenia do tego modelu są identyczne jak u Michela (1992), a przedstawione powyżej.

Średni czas pobytu wód w zlewni w tym przypadku można łatwo policzyć na podstawie równania:

$$C_{rz} = C_{op} e^{-\lambda\tau} \quad \text{skąd}$$

$$\tau = 17,94 \cdot \ln \left(\frac{C_{op}}{C_{rz}} \right)$$

gdzie:

stała 17,94 reprezentuje $T_{1/2}/\ln 2$,

$T_{1/2}$ – czas połowicznego rozpadu trytu.

Powyższy wzór jest identyczny ze wzorem odpowiadającym modelowi przepływu tłokowego, ale opisuje całkowicie odmienną sytuację fizyczną (Zuber i in., 2007). Podstawowa różnica polega na tym, że w modelu tłokowym zakłada się całkowity brak mieszania w trakcie przepływu, natomiast w modelu przedstawionym powyżej przyjmuje się pełne mieszanie. W warunkach ustalonych model taki zachowuje się stabilnie, tzn. na wypływie (w rzece) powinny występować stałe stężenia trytu.

W warunkach rzeczywistych w analizie przepływów wód w obrębie zlewni muszą być brane pod uwagę dodatkowe procesy, mające wpływ na wielkość stężeń trytu na wyjściu (w rzece). Najważniejszym z nich jest spływ powierzchniowy, którego zmienność udziału w wielkości przepływu podziemnego jest dla różnych typów zlewni bardzo duża. W odniesieniu do stężeń trytu zjawisko to można opisać wzorem będącym odpowiednikiem modelu Michela, a mianowicie:

$$C_{rz} = aC_{sp} + bC_{wp}$$

gdzie:

C_{rz} – stężenie trytu w wodach odpływających (w rzece),

Tab. 2. Parametry hydrogeologiczne wyznaczone przez Michela (1992) i Ranka i in. (1998) oraz Nowickiego i in. (w tej pracy)
Table 2. Hydrogeological parameters designated by Michel (1992), Rank et al. (1998) and Nowicki et al. (this work)

Michel (1992), Rank i in. (1998) <i>Michel (1992), Rank et al. (1998)</i>	Nowicki i in. (ta praca) <i>Nowicki et al. (this work)</i>
Średni czas pobytu wód podziemnych o wieku >1 roku w zlewni ($t = MRT$) <i>Mean residence time of groundwater older than 1 year in catchment ($t=MRT$)</i>	Średni czas pobytu wód podziemnych w zlewni (τ_{wp}) <i>Mean residence time of groundwater in catchment (τ_{wp})</i>
Udział wód powierzchniowych i podziemnych o wieku <1 roku (łącznie) w odpływie rzeczonym <i>Contribution of surface water and groundwater younger than 1 year in outflowing water (river)</i>	Średni czas pobytu wód w zlewni (τ) <i>Mean residence time of water in catchment (τ)</i>

C_{sp} – średnie stężenie trytu w wodach spływu powierzchniowego,

C_{wp} – średnie stężenie trytu w wodach podziemnych systemu hydrogeologicznego,

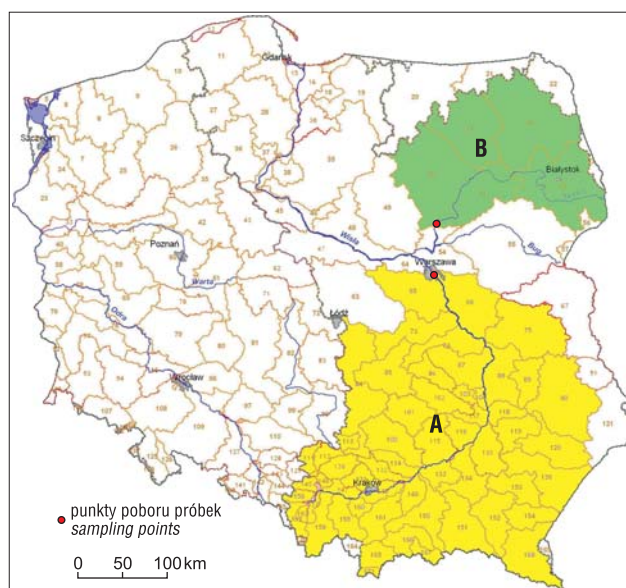
a, b – udziały wód ze spływu powierzchniowego i odpływu wód podziemnych w odpływie rzeczonym przy czym ($a + b = 1$).

Uwzględnienie spływu powierzchniowego w opisywanym modelu powoduje, że wyliczona wartość τ dotyczy średniego czasu pobytu wód (ze spływu powierzchniowego + podziemnych) w zlewni. Określenie średniego czasu pobytu wód podziemnych w zlewni jest związane z wyznaczeniem średniego stężenia trytu w rzece w warunkach braku udziału wód ze spływu powierzchniowego ($a = 0$). Jak wiadomo w hydrogeologii i hydrologii warunek ten jest spełniony przy stanach niżówkowych przepływów wód w rzekach. W zastosowanym modelu przyjęto zatem, że średni czas pobytu wód podziemnych (τ_{wp}) w zlewni wyznaczono na podstawie średnich stężeń trytu w rzece w okresach stanów niżówkowych. Należy zwrócić uwagę, że wprowadzony przez autorów parametr τ_{wp} nie jest tożsamy z wielkością MRT wg Michela (1992) i Ranka i in. (1998). Ilustruje to tabela 2.

TRYT W WIŚLE I NARWI

Badania zmian zawartości trytu w wodach Wisły i Narwi przeprowadzono w ramach zadań państwowej służby hydrogeologicznej (Leśniak i in., 2015) w okresie kwiecień 2013 –marzec 2014 r. Próbkę z Wisły były pobierane w Warszawie z częstotliwością raz na tydzień, natomiast z Narwi raz na miesiąc w miejscowości Zambski, tj. ok. 14 km powyżej Pułtuska. Zarówno w Warszawie, jak i w Zambskach próbki pobierano w pobliżu punktów wodowskazowych stanów wody w rzekach.

Punkt poboru próbek w Warszawie reprezentuje fragment zlewni Wisły o powierzchni nieco ponad 83 000 km² obejmujący obszary o charakterze górskim, wyżynnym i nizinym. Średni roczny przepływ Wisły na przekroju w Warszawie wynosi 561 m³/s. Punkt w Zambskach jest reprezentatywny dla niemal całej zlewni Narwi (pow. ok. 28 000 km²), która ma charakter typowo nizinny. Średni roczny przepływ w Narwi w Zambskach wynosi 146 m³/s. Obszary zlewni na tle granic JCWPd (Jednolitych Części Wód Podziemnych) przedstawiono na rycinie 5.



Ryc. 5. Fragmenty zlewni Wisły (A) i Narwi (B) reprezentowane przez punkty poboru w Warszawie i Zambskach na tle granic JCWPd

Fig. 5. Sampling points in Warsaw and Zambski representing part of the Vistula Basin (A) and Narew Basin (B) respectively within the groundwater bodies

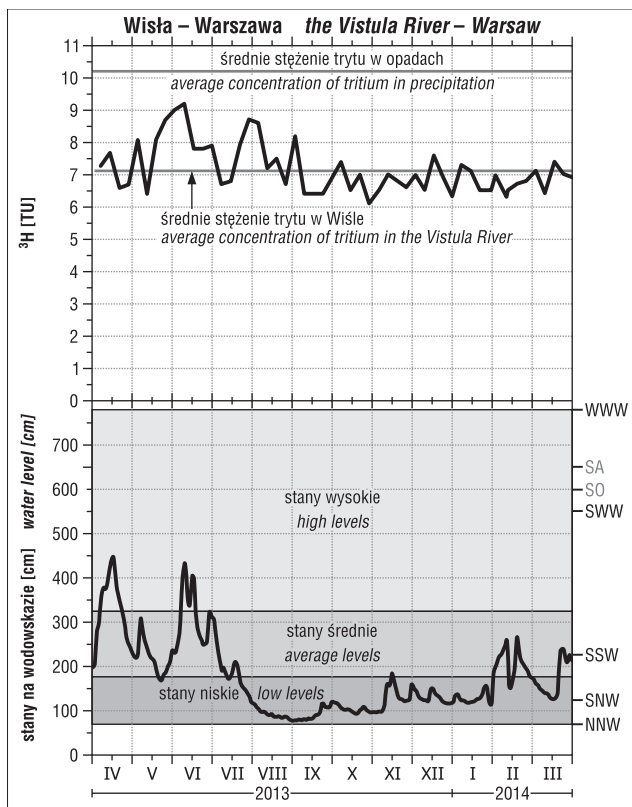
W okresie obserwacyjnym najwyższe stężenia trytu wynoszące 9,2 TU stwierdzono w pierwszej dekadzie czerwca 2013 r. i towarzyszyły one stanowi wysokiemu wód Wisły (ryc. 6). Ta dość duża zawartość trytu jest wynikiem nakładania się dwóch efektów: występowania podwyższonych stężeń trytu w opadach w okresie wiosenno-letnim oraz znacznemu udziałowi w przepływie rzeki wód ze spływu powierzchniowego, w wyniku opadów. Najniższe stężenie trytu wynoszące 5,1 TU zaobserwowano na przełomie października i listopada 2013 r., w okresie bardzo niskich stanów na Wiśle. Średnie stężenie trytu w wodach Wisły w okresie obserwacyjnym wynosiło 7,1 TU, przy średniej ważonej w opadach 10,2 TU.

Przyjmując $C_{op} = 10,2$ TU oraz $C_{rz} = 7,1$ TU, obliczono ze wzoru $\tau = 17,94 \cdot \ln(C_{op}/C_{rz})$, że średni czas pobytu wód w badanym fragmencie zlewni Wisły wynosi 6,5 lat. Fragment krzywej $C_{rz} = C_{op} e^{-\lambda t}$ na tle zmian stężeń trytu w opadach przedstawiono na rycinie 7. Ponieważ średnie stężenie trytu w okresie niżówkowym wynosiło 6,6 TU, średni czas pobytu wód podziemnych w zlewni Wisły wynosi 8,0 lat.

Analogiczne obliczenia wykonano dla Narwi, dla której stężenia trytu oraz zmienność stanów wód na wodowskazie w Zambskach przedstawiono na rycinie 8.

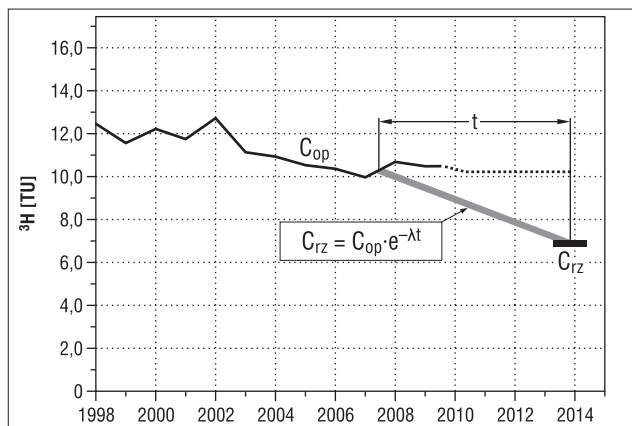
Średnie w roku obserwacyjnym stężenie trytu w Narwi wynosiło 7,4 TU natomiast średnie stężenie trytu w okresie niżówkowy = 7,3 TU Obliczony średni czas pobytu wód w tej zlewni wynosił 5,7 lat, natomiast średni czas pobytu wód podziemnych = 6,0 lat.

Średni czas pobytu wód podziemnych zależy głównie od możliwości retencyjnych zlewni w strefie intensywnej wymiany wód, parametrów mających wpływ na prędkość przepływu podziemnego, tj. przepuszczalności i wielkości spadków hydraulicznych w tej strefie oraz gęstości sieci rzecznej (lub innych form drenażu) w zlewni.



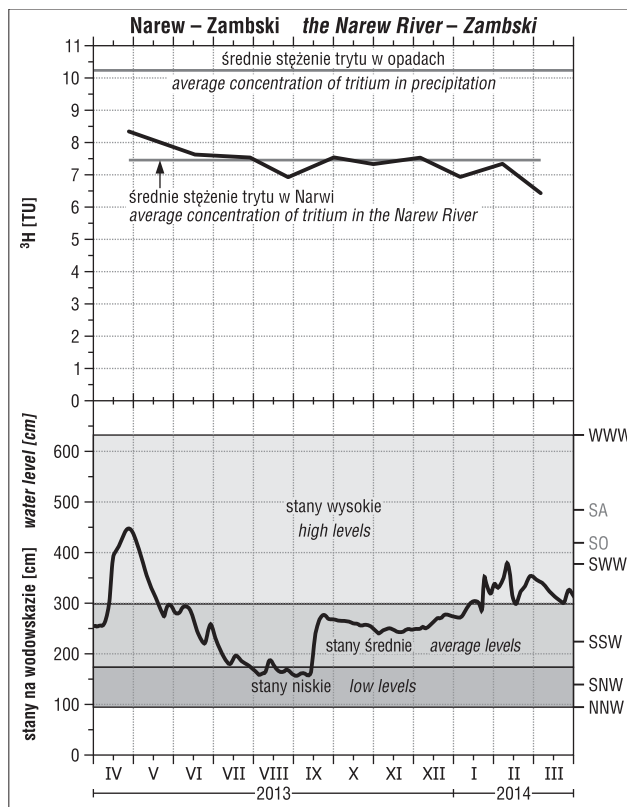
Ryc. 6. Zmiany zawartości trytu w wodach Wisły w okresie od kwietnia 2013 r. do marca 2014 r. oraz stany Wisły na wodowskaziu w Warszawie. Od lipca 2013 r. do lutego 2014 r. widoczna niżówka oznaczająca dominację dopływu podziemnego w przepływie rzeki. Objasnienia: WWW – najwyższy stan zarejestrowany w wieloleciu, SA – stan alarmowy, SO – stan ostrzegawczy, SWW – średni stan z wysokich z wielolecia, SSW – średni stan ze średnich z wielolecia, SNW – średni stan z niskich z wielolecia, NNW – najniższy stan zarejestrowany w wieloleciu

Fig. 6. Changes of tritium content in the Vistula River in the period of April 2013–March 2014 and water level data of the Vistula River in Warsaw. Apparent low flow from July to September 2013 reveals dominance of river drainage. Explanations: WWW – highest water level registered in long-term data, SA – state of alert, SWW – average level from high water levels in long-term data, SSW – average level from average water levels in long-term data, SNW – average level from low water levels in long-term data, NNW – lowest water level registered in long-term data



Ryc. 7. Fragment krzywej $C_{rz} = C_{op} e^{-\lambda t}$ dla $C_{rz} = 7,1$ TU na tle rzeczywistej zmienności C_{op} w latach 1998–2013. C_{rz} – średnie stężenie trytu w Wiśle w okresie obserwacyjnym

Fig. 7. Part of curve $C_{rz} = C_{op} e^{-\lambda t}$ for $C_{rz} = 7.1$ TU within the natural variations of C_{op} in the years 1998–2013. C_{rz} is the average tritium concentration in the Vistula River within the observation term



Ryc. 8. Zmiany zawartości trytu w wodach Narwi w okresie od kwietnia 2013 r. do marca 2014 r. oraz stany Narwi na wodowskaziu w Zambskich. Od lipca do sierpnia 2013 widoczna niżówka oznaczająca dominację dopływu podziemnego w przepływie rzeki (objasnienia jak przy ryc. 6)

Fig. 8. Changes of tritium content in the Narew River in the period of April 2013–March 2014 and water level data of the Narew River in Zambski. Apparent low flow from July to September 2013 reveals dominance of river drainage (for explanations see Fig. 6)

Badana część zlewni Narwi ma charakter nizinny i jest dość jednorodna pod względem budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i morfologii terenu. Można zatem uznać, że uzyskany z badań średni czas pobytu wód podziemnych wynoszący 6,0 lat jest charakterystyczny dla obszaru całej zlewni.

Zupełnie inaczej przedstawia się sytuacja w obrębie fragmentu zlewni Wisły powyżej Warszawy. Obejmuje on obszary o charakterze górskim, wyżynnym i nizinnym, a więc tereny bardzo zróżnicowane pod względem morfologicznym. Jest to niezwykle ważne ze względu na duże różnice na tych obszarach w proporcji udziału spływu powierzchniowego i dopływu podziemnego w odpływie powierzchniowym (rzecznym) mającego bezpośredni wpływ na wartość τ . Dla zlewni Wisły średni czas pobytu wód podziemnych wynoszący 8,0 lat jest wartością zgeneralizowaną, tzn. uśrednioną dla całego obszaru, natomiast w przypadku zlewni cząstkowych o różnym charakterze morfologicznym i geologicznym należy spodziewać się odmiennych wyników. Dotyczy to zwłaszcza zlewni karpackich, dla których należy oczekiwać znacznie niższych wartości τ .

PODSUMOWANIE

Wyznaczenie wartości MRT z wykorzystaniem trytu zarówno metodą modelowania bilansowego zapropono-

waną przez Michela (1992), jak i metodą wyznaczenia wielkości przesunięcia krzywej trytowej w rzece w stosunku do krzywej trytowej w opadach, przedstawioną przez autorów tego artykułu, wymaga posiadania danych dotyczących wyników długoczasowych obserwacji zmian stężeń trytu w rzece i w opadach. Niestety badania takie w przeszłości były prowadzone niezwykle rzadko i tylko dla niewielu rzek na świecie istnieją tego typu dane izotopowe i, co za tym idzie, możliwość wyliczenia średniego czasu pobytu wody w zlewni.

Obecnie, po niemal całkowitym zakończeniu procesu wymywania trytu „bombowego” z atmosfery i zmianie relacji stężeń C_{op}/C_{rz} , powstały całkowicie nowe możliwości wykorzystania trytu do wyznaczenia wartości τ_{wp} w zlewniach rzecznych. Pomimo niektórych opinii sugerujących malejące znaczenie trytu, autorzy podtrzymują diagnozę o rosnącym znaczeniu tego nuklidu w badaniach hydrogeologicznych i hydrologicznych wypowiedzianą wcześniej w innym miejscu (Nowicki i in., 2015).

Autorzy dziękują dr. hab. Jackowi Rózkowskiemu i anonimowemu Recenzentowi za konstruktywne uwagi.

LITERATURA

- AGGARWAL P.K., ARAGUAS-ARAGUAS L.J., GROENING M., KULKARNI K.M., KURTTAS T., NEWMAN B. & VITVAR T. 2010 – Global hydrologic isotope data and data networks. [W:] West J.B., Bowen G.J., Dawson T.E. & TU K.P. (red.), *Isoscapes: Understanding movement, pattern and process on Earth through isotope mapping*. Springer: 33–51.
- CALMON P. & GARNIER-LAPLACE J. 2006 – Tritium and the environment. *IRSN*, 26.
- DULIŃSKI M., KUC T. & RÓŻAŃSKI K. 2015 – Oznaczenia laboratoryjne zawartości trytu w 428 próbach wód podziemnych wraz z opisem wyników. Raport Towarzystwa Badania Przemian Środowiska „Geosfera”, Kraków.
- KAUFMANN S. & LIBBY W.F. 1954 – The natural distribution of tritium. *Phys. Rev.*, 936: 1337–1344.
- LIBBY W.F. 1946 – Atmospheric helium three and radiocarbon from cosmic radiation. *Phys. Rev.*, 69: 671–672.
- LUCAS L.L. & UNTERWEGER M.P. 2000 – Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *J. Res. Nation. Inst. Standarts Technol.*, 105: 541–549.
- 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: 22–31.
- MICHEL R.L. 1992 – Residence times in river basins as determined by analysis of long-term tritium record. *J. Hydrol.*, 130: 367–378.
- LEŚNIAK P.M., NOWICKI Z. & WILAMOWSKI A. 2015 – Dynamika zasilania wód podziemnych w punktach monitoringu JCWPd. Raport PSH. PIG-PIB, Warszawa.
- NOWICKI Z., LEŚNIAK P.M. & WILAMOWSKI A. 2015 – Zawartość trytu i skład izotopowy tlenu w płytkich wodach podziemnych w punktach badawczych krajowej sieci monitoringu. *Prz. Geol.*, 63: 976–980.
- OSTLUND H.G. & FINE R.A. 1979 – Oceanic distribution and transport of tritium. [W:] *Behaviour of tritium in the environment. Proc. Symp. IAEA*.
- RANK D., ADLER A., ARAGUÁS ARAGUÁS L., FROEHLICH K., ROZANSKI K. & STICHLER W. 1998 – Hydrological parameters and climatic signals derived from long-term tritium and stable isotope time series of the River Danube. [W:] *Isotope Techniques in the Study of Environmental Change. IAEA-SM-349, IAEA, Vienna: 191–205*.
- RANK D., PAGESCH W., RAJNER V. & TESCH R. 2000 – Kurzzeitige Anstiege der ^3H Konzentration in Donau und March. *Limnological Reports der 33. Konferenz der Internationalen Arbeitsgemeinschaft Donauforschung. Osijek, Kroatien (Pädagogische Fakultät der Universität): 35–40*.
- RANK D. & PAGESCH W. 2010 – Mean residence time (MRT) of base flow water in the Upper Danube Basin derived from decadal climatic signal in long-term isotope records of river water. 38 IAD Conference Dresden. Presentation 008.
- RANK D., PAGESCH W., HESS R. & TESCH R. 2012 – Environmental isotope ratios of river water in the Danube Basin. *Monitoring isotopes in rivers. IAEA TEC-DOC-1673: 13–40*.
- RANK D., WYHLIDAL S., SCHOTT K., JUNG M., HEISS G. & TUDOR M. 2014 – A 50 years isotope record of the Danube river water and its relevance for hydrological, climatological and environmental research. *Acta Zoolog. Bulgar., Suppl. 7: 109–115*.
- VITVAR T., AGGARWAL P.K. & HERCZEG A.L. 2007 – Global Network is launched to monitor isotopes in rivers. *Eos Trans. AGU 8833: 325–326*.
- ZUBER A. (red) i in. 2007 – *Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych. Oficyna Wydaw. Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, s. 402*.

Praca wpłynęła do redakcji 29.06.2015 r.
Akceptowano do druku 13.10.2015 r.