

PROBLEMY OKREŚLENIA „WIEKU” WÓD PODZIEMNYCH DRENOWANYCH PRZEZ ŹRÓDŁA PIENIŃSKIE

PROBLEMS IN “AGE” DATING OF GROUNDWATER DRAINED BY THE PIENINY SPRINGS

WŁODZIMIERZ HUMNICKI¹, MARZENA SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA¹, ADAM POROWSKI²

Abstrakt. W artykule zaprezentowano wyniki oznaczeń trytu w wodach z czterech źródeł usytuowanych na terenie Pienińskiego Parku Narodowego. Za pomocą programu FLOWPC podjęto próbę oszacowania trytowego wieku wód w systemie hydrogeologicznym, tj. czasu wymiany wody w zbiornikach drenowanych przez źródła. Z uwagi na skomplikowany porowo-szczelinowy system krążenia wód i niewielkie obszary zasilania najbardziej prawdopodobne wyniki uzyskuje się dla modeli dyspersyjnych i eksponencjalno-tłokowych. Uzyskane wyniki szacowania wieku wód, niezależnie od przyjętego modelu i jego parametrów, potwierdzają stosunkowo młody wiek wód, nieprzekraczający najprawdopodobniej 30 lat, i świadczą o drenowaniu przez badane źródła wód współczesnego zasilania infiltracyjnego.

Słowa kluczowe: trytowy wiek wód, źródła, pieniński pas skałkowy, modele matematyczne, Pieniński Park Narodowy.

Abstract. The paper presents the results of tritium determinations in four springs located within the Pieniny National Park. The attempt of assessing the age of groundwater, *i.e.* the groundwater tritium turnover time in the drained reservoirs was made using the FLOWPC computer code application. Due to the complex fissure-pore groundwater circulation system as well as relatively small recharge areas, the most reliable results were obtained for dispersion and exponential-piston flow models. The obtained groundwater age estimations, regardless of the assumed model and its parameters, corroborated the relatively young age of studied waters, presumably not exceeding 30 years. This proves that the studied springs in the Pieniny National Park are recharged mainly by modern infiltration.

Key words: tritium age of water, springs, Pieniny Klippen Belt, mathematical models, Pieniny National Park.

WSTĘP

Badania krenologiczne odgrywają ważną rolę na terenach parków narodowych, gdzie z uwagi na ochronę przyrody nie można wykonywać wierceń umożliwiających rozpoznanie parametrów hydrogeologicznych masywu i warunków krążenia wód podziemnych. Taka sytuacja występuje m.in. na terenie Pienińskiego Parku Narodowego, który należy do najcenniejszych przyrodniczo obszarów Polski i Słowacji (Małecka, Humnicki, 2001, 2002). Szczęólnego znaczenia nabierają wtedy obserwacje stacjonarne wydajności i chemizmu źródeł, które pozwalają prześledzić zjawiska przyrodnicze w cyklu rocznym i wieloletnim (Humnicki, 2006a, 2007a, b, c, 2012a, b, 2013, 2015, 2017; Szostakiewicz-Ho-

łownia, 2018). Cennych informacji na temat zasilania i krążenia wód podziemnych dostarczają również obserwacje składu izotopowego wód zarówno stabilnych izotopów tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) i wodoru ($\delta^2\text{H}$), jak i aktywności promieniotwórczego trytu (^3H) (np. Zuber, 1999, 2007; Zuber i in., 1999, 2008; Porwiz i in., 2011). W zależności od warunków hydrogeologicznych, oznaczenia aktywności trytu (czas połowicznego rozpadu 12,43 lat) wykorzystuje się w szczególności do oceny tzw. wieku wód – czyli czasu wymiany wód w zbiorniku. W Pieninach oznaczenia stabilnych izotopów O i H w wodzie oraz aktywności trytu ^3H wykonano po raz pierwszy w latach 2003–2004 dla trzech źródeł: Kotłowego Potoku, Potoku pod Wysokim Działem i Stuletniego oraz w wodzie opadowej z Krościenka – Białego Potoku. Obecność

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: w.humnicki@uw.edu.pl, marzena.szostakiewicz@uw.edu.pl.

² Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa; e-mail: adamp@twarda.pan.pl.

w znacznym stężeniu trytu (od 10,7 do 13,6 T.U.) wyraźnie potwierdziła związek zbiorników wód podziemnych drenowanych przez źródła pienińskie z intensywnym, współczesnym zasilaniem infiltracyjnym. Dysponując jednorazowymi oznaczeniami aktywności ^3H w źródłach, na podstawie czasu połowicznego rozpadu określono przybliżony trytowy wiek wód podlegających ciągłej aktywnej wymianie w zbiorniku w granicach od 1 miesiąca dla źródła Stuletniego do 4–5 lat dla źródła potoku Kotłowego (Humnicki, 2006b, 2007c). W ostatnich latach w wymienionych źródłach oraz dodatkowo w źródle potoku Czarnego (Szostakiewicz-Hołownia, 2018) wykonano kilka kolejnych oznaczeń izotopowych wody, w tym oznaczenia aktywności ^3H . Badania te umożliwiły podjęcie próby wyznaczania trytowego wieku wód przy użyciu prostych modeli matematycznych. W niniejszej pracy przedstawiono wstępne wyniki szacowania trytowego wieku wód, tj. czasu wymiany wody w zbiornikach drenowanych przez źródła, na podstawie modelowania matematycznego z wykorzystaniem programu FLOWPC. Zaprezentowano czasy wymiany wody w zbiorniku, oszacowane przy użyciu modeli: dyspersyjnego (DM), eksponencjalnego (EP) i mieszanego – eksponencjalno-tłokowego (EPF) i omówiono główne problemy związane z ich dopasowaniem.

CHARAKTERYSTYKA HYDROGEOLOGICZNA ŹRÓDEŁ PIENIŃSKIEGO PASA SKALKOWEGO

Pieniński pas skalkowy jest jednostką geologiczną rozdzielającą Karpaty wewnętrzne i zewnętrzne, a pod względem stylu budowy geologicznej należy do najbardziej skomplikowanych obszarów w Europie a nawet na świecie (Birkenmajer, 1979, 2017). Mozaikowa budowa geologiczna pasa, przejawiająca się w sąsiedztwie niewielkich powierzchniowo, lecz odmiennych litologicznie utworów, wpływa na duże zróżnicowanie i komplikację warunków hydrogeologicznych. Jest to obszar o słabym zawodnieniu, nie kwalifikującym się do wyróżnienia poziomów wodonośnych o charakterze użytkowym (Chowaniec, Witek, 1997).

Źródła Potoku pod Wysokim Działem (nr 1, [fig 1](#)) oraz Kotłowego (nr 3) od 2003 r. są objęte stacjonarnymi obserwacjami limnometrycznymi z automatyczną rejestracją danych w interwale 60 minut, dodatkowo w źródłach potoków Czarnego (nr 2) oraz Kotłowego (nr 3) od 2013 r. w interwale 30 minut automatycznie rejestrowane są za pomocą DIVER-ów pomiary stanów wody oraz jej temperatury. Równocześnie z badaniami nad dynamiką wydajności omawianych źródeł okresowo są określane właściwości fizykochemiczne wód oraz pobierane próbki do analiz laboratoryjnych obejmujących oznaczenia mineralizacji i składu jonowego. Wyniki tych badań prezentowano w szeregu wcześniejszych publikacji autorów (Humnicki, 2007c, 2013, 2015, 2017; Szostakiewicz-Hołownia, 2012, 2015, 2018). Położone po słowackiej stronie Dunajca Źródło Stuletnie (nr 4) nie jest objęte obserwacjami stacjonarnymi.

Źródło Potoku pod Wysoki Dział (nr 1) jest położone po północnej stronie Pienin Czorsztyńskich na wysokości 664 m n.p.m. na dnie wyraźnej depresji terenu, wcinającej się w zachodni stok Wysokiego Działu i inicjuje prawostronny dopływ Białego Potoku. Pod względem położenia morfologicznego jest to źródło zboczowe. Wyływ jest ekranowany zwietrzeliną, w której przeważa rumosz wapienno-fliszowy. W pobliżu źródła odsłaniają się utwory formacji wapienia pienińskiego należące do jednostki braniskiej. Przebieg średnich miesięcznych wydajności (od 0,1 do 3,6 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pozwala zaliczyć źródło do VI i V klasy Meinzera – jest to więc jedno z najbardziej wydajnych źródeł pienińskich o stałym charakterze wypływu. Charakterystyczną cechą źródła Potoku pod Wysoki Dział jest względna stabilność wydajności wynikająca z własnego reżimu hydrogeologicznego, niezależnego od bieżących opadów atmosferycznych. Reakcja na zasilanie opadowe i roztopowe wykazuje znaczne opóźnienie, jest bardzo rozmyta i rozciągnięta w czasie. Źródło wykazuje reżim wybitnie roztopowy z jedną kulminacją na przełomie kwietnia i maja (Humnicki, 2015).

Źródło Czarnego Potoku (nr 2) inicjuje lewostronny dopływ Macelowego Potoku i jest położone na wysokości 684 m n.p.m. na stoku Góry Kira. Woda wypływa ze szczeliny w wapieniach rogowcowych (jednostka pienińska). Średnie roczne wydajności tego źródła (0,32–0,36 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pozwalają zaliczyć je do VI klasy Meinzera. Analizując rozkład średnich miesięcznych wydajności, stwierdzono występowanie w tym źródle dwóch wyraźnych kulminacji w ciągu roku hydrologicznego. Pierwsza z nich jest związana z roztopami, natomiast druga z letnimi opadami atmosferycznymi, stąd też reżim tego źródła (w zależności, która z kulminacji dominuje) można określić jako opadowo-roztopowy lub roztopowo-opadowy (Szostakiewicz-Hołownia, 2018).

Źródło Kotłowego Potoku (nr 3), będącego lewostronnym dopływem Macelowego Potoku, jest położone na wysokości 639 m n.p.m. na bardzo stromym, południowym zboczu najwyższego szczytu Pienin Czorsztyńskich – Nowej Góry, w lokalnej depresji terenu. Odsłaniają się tu przykryte zwietrzeliną paleogeńskie piaskowce i łupki z wkładkami zlepieńców oraz utwory formacji wapienia pienińskiego, należące do jednostki pienińskiej. W wyniku analizy reakcji wydajności źródła na opady atmosferyczne oraz sposobu jego wysychania stwierdzono złożony typ zasilania tego źródła, w którym biorą udział dwa systemy krążenia: głębszy, związany ze strefą dyslokacyjną, oraz płytszy, w którym duży udział ma odpływ podpowierzchniowy o charakterze krótkookresowym (Humnicki, 2006a, 2012b). Źródło Kotłowego Potoku wykazuje reżim roztopowo-opadowy, czego przejawem jest występowanie dwóch kulminacji wydatku. Najwyższe wydatki są związane z zasilaniem roztopowym i występują w kwietniu. Druga, nieco niższa, ale wyraźna kulminacja, związana z letnimi opadami atmosferycznymi, pojawia się w sierpniu.

Stuletnie Źródło (nr 4) jest to najbardziej wydajne źródło pienińskie, położone na wysokości ok. 430 m n.p.m. na słowackim brzegu Dunajca u podnóża Golicy. Jest to źródło

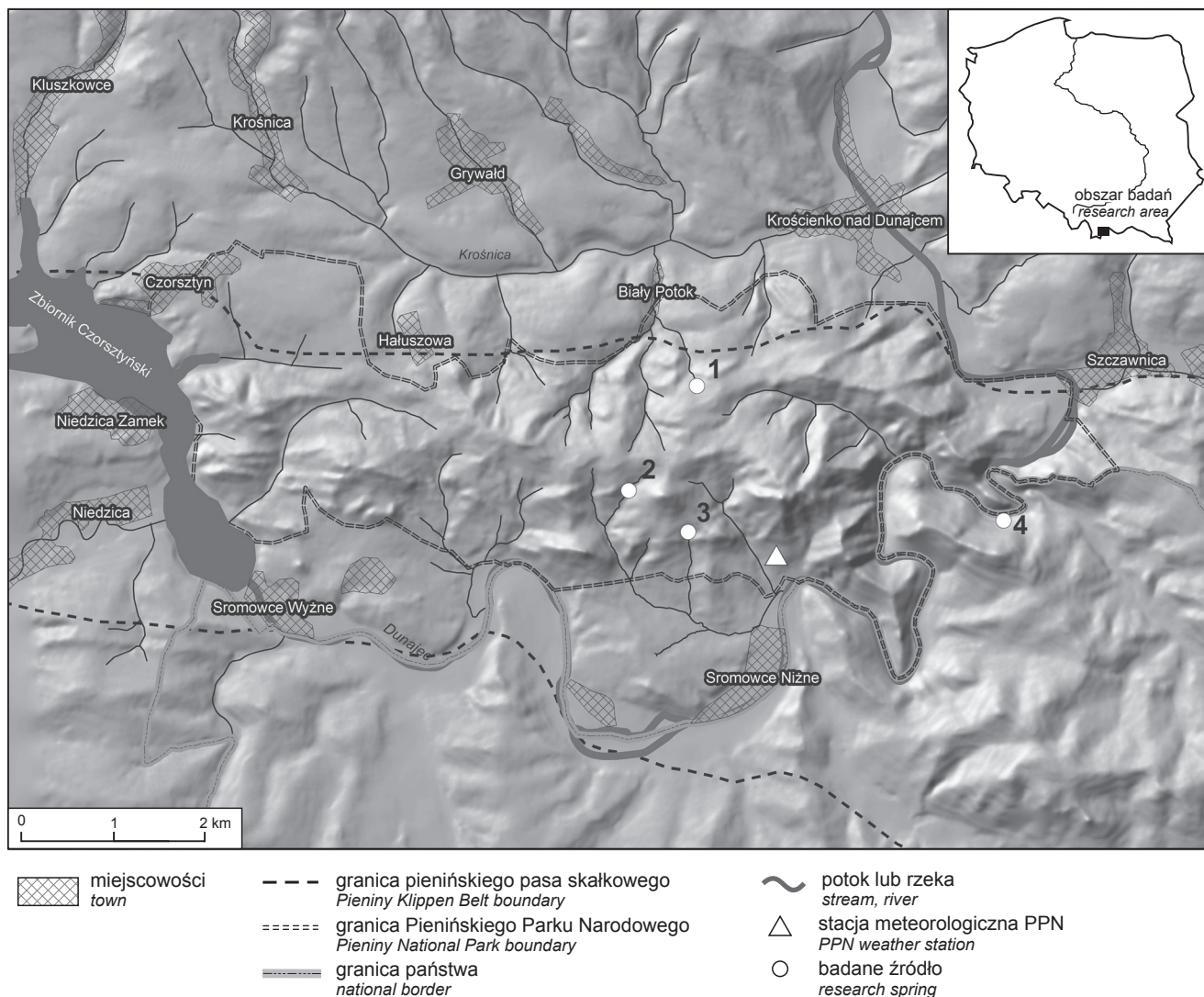


Fig. 1. Lokalizacja badanych źródeł

1 – źródło Potoku pod Wysoki Dział, 2 – źródło Czarnego Potoku, 3 – źródło Kotłowego Potoku, 4 – źródło Stuletnie

Location of the springs studied

1 – spring of the Wysoki Dział Stream, 2 – spring of the Czarny Stream, 3 – spring of the Kotłowy Stream, 4 – spring Stuletnie

szczelinowo-krasowe, którego wydajność okresowo osiąga wartość kilkudziesięciu $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Lokalny rozwój zjawisk krasowych w tym rejonie należy wiązać ze znacznieszą powierzchnią zajmowaną przez utwory węglanowe (wapień formacji wapienia pienińskiego) oraz przyczynami natury tektonicznej, do których należy zaliczyć dyslokację poprzeczną przecinającą masyw Golicy. Wpływ źródła usytuowany jest niemal równo z lustrem wody i w czasie wysokich stanów rzeki jest okresowo zalewany. Nie stwierdzono bezpośredniego zasilania źródła wodami Dunajca (Humnicki, 2007c). Zaobserwowano szybką i wyraźną reakcję wydajności na opady atmosferyczne.

Wszystkie badane źródła charakteryzują się stosunkowo stabilnym składem jonowym i podobieństwem hydrochemicznym, dominującym typami wód są $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ oraz $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (tab. 1).

Tabela 1

Skład chemiczny wód badanych źródeł (w mg/dm^3)
Chemical composition of water in the springs (in mg/dm^3)

	Źródło			
	Potoku pod Wysoki Dział (nr 1)	Czarnego Potoku (nr 2)	Kotłowego Potoku (nr 3)	Stuletnie (nr 4)
Liczba analiz (lata)	22 (1997–2010)	21 (2002–2015)	29 (1997–2010)	4 (1997–2010)
TDS	230–300	344–419	230–330	210–240
Na^+	0,7–11,3	2,0–4,9	2,2–14,7	2,8–8,8
K^+	0,1–7,4	0,7–1,3	0,1–5,5	0,5–5,1
Ca^{2+}	62,7–73,1	61,6–88,3	59,7–101,2	60,1–65,2
Mg^{2+}	6,6–31,6	8,0–15,6	7,1–26,2	3,8–10,3
Cl^-	3,2–11,0	0,7–5,3	2,1–10,3	8,9–12,4
SO_4^{2-}	21,1–42,3	15,0–29,0	16,8–76,9	26,9–31,2
HCO_3^-	214,2–297,8	236,3–280,7	222,7–334,8	191,0–197,7

Chemizm wód wskazuje, że drenowane są głównie wody podziemne strefy aktywnej wymiany. Świadczy o tym również skład izotopowy badanych wód, typowy dla wód pochodzenia infiltracyjnego rejonu Pienin (Humnicki 2007c; Szostakiewicz-Hołownia, 2018).

WYNIKI OZNACZEŃ TRYTU I DYSKUSJA SZACOWANIA WIEKU WÓD ŹRÓDEŁ PIENIŃSKICH

Pierwsze oznaczenia składu stabilnych izotopów tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) i wodoru ($\delta^2\text{H}$) oraz aktywności promieniotwórczego trytu (^3H) wykonano dla źródeł potoków pod Wysoki Dział i Kotłowego oraz źródła Stuletniego w 2003 r. Kolejne analizy izotopowe wykonywano w latach 2004, 2011, 2012 i 2014 (tab. 2). Badania wykonywano w Laboratorium Datowania Izotopowego i Badań Środowiska Instytutu Nauk Geologicznych PAN w Warszawie. Tryt jest zaliczany do grupy idealnych znaczników wody, gdyż stanowi on część składową molekuł wody: cząstka wody z trytem – $^3\text{H}^1\text{H}^1\text{O}$, cząstka wody zwykłej – $^1\text{H}^1\text{H}^1\text{O}$. Interpretacja danych znacznikowych dla systemów hydrogeologicznych zasilanych w głównej mierze współczesnymi wodami infiltracyjnymi opiera się na założeniu istnienia stałego (ustalonego) przepływu wody. Założenie stanu ustalonego przepływu daje dobre rezultaty interpretacji, jeśli zmiany wydatku przepływu zachodzą w krótszych czasach niż średni czas przepływu trytu, nawet w przypadku systemów o dużej zmienności wydatku przepływu i objętości (Zuber i in., 1986). Dane trytowe są zazwyczaj interpretowane modelami matematycznymi opisanymi przez Małoszewskiego i Zuber (1982, 1996) przy zastosowaniu programu FLOWPC (Małoszewski, Zuber, 1996). W modelach tych zakłada się, że dany system podziemny jest reprezentowany przez jedną lub dwie

szeregowo połączone komory (Zuber, 1999). Zmiany czasowe znacznika na wejściu do systemu hydrogeologicznego muszą być znane i jest to tzw. funkcja wejścia $C_{in}(t)$. Zmiany czasowe stężenia na wyjściu $C_{out}(t)$ muszą być mierzone. W tym przypadku funkcja wejścia została przygotowana zgodnie z metodyką zalecaną przez Małoszewskiego i Zuber (1997). Wykorzystano publikowaną na stronach internetowych IAEA (www.iaea.org) zmienność stężenia trytu w opadach atmosferycznych w Krakowie (Wola Justowska, Balice), natomiast sumę miesięcznych opadów atmosferycznych przyjęto ze stacji opadowej usytuowanej możliwie najbliżej badanych źródeł. Jest to stacja Pienińskiego Parku Narodowego na polanie Podłaźce w Sromowcach Niżnych (fig. 1). Dopasowując obliczone stężenia trytu do wartości mierzonych na wyjściu, można znaleźć typ modelu i wartości jego parametrów, które są przydatne do interpretacji systemu hydrogeologicznego (Zuber, 1999). Program FLOWPC jest stosowany przez wielu badaczy zajmujących się problematyką wyznaczania trytowego wieku wód (np. Małoszewski, Zuber, 1997; Zuber, 1999, Zuber i in., 1999, 2008; Porwicz i in., 2011; Duliński i in., 2013, 2017; Postawa, d’Obyrn, 2013; Porowski, 2014). Najczęściej najlepsze wyniki dopasowania dają modele: (i) eksponencjalny (EM), w którym zakłada się wykładniczy rozkład przepływu wód w systemie hydrogeologicznym; (ii) kombinowany (EPM), będący połączeniem modelu eksponencjalnego i tłokowego (PFM), w którym część tłokowa odpowiada części systemu z liniami przepływu o tej samej długości i prędkości z zaniebdywalnie niską dyspersją; (iii) dyspersyjny (DM), w którym zakłada się, że rozkład czasów przepływu jest opisany rozwiązaniem jednowymiarowego równania dyspersji (Małoszewski, Zuber, 1996; Zuber, 1999).

Wstępne wyniki interpretacji wieku wód źródeł w Pieniach, zastosowane modele matematyczne oraz ich parametry przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Stężenia trytu, zastosowane modele wraz z przyjętymi parametrami oraz wyniki interpretacji z użyciem programem FLOWPC

Tritium concentrations and estimated turnover times for assumed mathematical models and their parameters (using the FLOWPC computer code application)

Źródło	Data pobrania	Tryt [T.U.]	Model*	η [-]	P_D [-]	β	$c\beta$ [T.U.]	Wiek [lata]
Potoku pod Wysoki Dział (nr 1)	11 VI 2003	13,6 ±0,7	EPM	1,0				17
	22 VIII 2004	13,02 ±0,79	DM		0,7			26
	27 VI 2011	10,2 ±0,2			0,2(?)			76(?)
Czarnego Potoku (nr 2)*	26 IX 2012	4,65 ±0,18	EM					23
	27 IV 2014	5,72 ±0,16	EPM	1,17				21
	29 VII 2014	5,59 ±0,15	DM		0,7			23
Kotłowego Potoku (nr 3)	14 VI 2003	11,30 ±0,6	EPM	2,2		0,5	4	26
	22 VIII 2004	10,72 ±0,47						
	29 VI 2011	8,6 ±0,2	DM		0,1		17	
	27 IX 2012	4,93 ±0,18						
26 IV 2014	4,65 ±0,11							
Stuletnie (nr 4)	11 VI 2003	13,3 ±0,7	EPM	1,0				16
	24 VIII 2004	13,56 ±0,28		1,0				50(?)
	27 VI 2011	8,8 ±0,3	DM		0,6			22

EPM – model mieszany eksponencjalno-tłokowy, EM – model eksponencjalny, DM – model dyspersyjny; * wg Szostakiewicz-Hołowni, 2018
EPM – mixed model, exponential-piston flow, EM – exponential model, DM – dispersion model, * after Szostakiewicz-Hołownia, 2018

W Pieninach, poza wodami porowymi zwietrzelin i aluwów, główny przepływ wód podziemnych w samym spękanym masywie skalnym, jaki stanowią utwory węglanowe, węglanowo-ilaste i fliszowe pienińskiego pasa skałkowego, odbywa się szczelinami. Główną rolę w magazynowaniu wód podziemnych odgrywiają jednak mikropory w blokach skalnych, czyli tzw. matryca skalna. Fakt ten potwierdziły badania terenowe i laboratoryjne wybranych kompleksów litologicznych pienińskiego pasa skałkowego, takich jak wapienie formacji wapienia pienińskiego, wapienia ze Smolegowej oraz wapienia z Krupianki, margle formacji z Jaworek czy też piaskowce i mułowce formacji sromowieckiej (Humnicki, 2007c, 2009). Z punktu widzenia możliwości przepływu wód podziemnych, matrycę skalną utworów pienińskiego pasa skałkowego należy uznać za nieprzepuszczalną lub w najlepszym przypadku półprzepuszczalną. W rozumieniu modelu pojęciowego sieci hydraulicznej mamy więc do czynienia ze zbiornikiem szczelinowo-porowym, gdzie pory nie odgrywiają istotnej roli w przewodzeniu wody, a dominującą rolę w przepływie wód podziemnych odgrywiają szczeliny. Z uwagi na fakt, że matryca skalna buduje przeważającą część ośrodka skalnego, a pory zajmują w niej nieporównanie większą objętość niż szczeliny, jest ona głównym elementem pojemnościowym tego ośrodka, gdzie mogą gromadzić się znaczne objętości wód podziemnych. Porowatość matrycowa stwarza też możliwość dyfuzyjnego przenikania substancji ze szczelin i kanalików aktywnie przewodzących wodę i opóźnienia migracji substancji względem średniej szybkości wód podziemnych. Dotyczy to także migracji znacznika środowiskowego jakim jest tryt, a co za tym idzie na uzyskiwanego trytowego wieku wód (Zuber, 2007). W przypadku źródeł pienińskich, z uwagi na skomplikowane warunki geologiczne i hydrogeologiczne, na obecnym etapie badań, nie można w sposób jednoznaczny opowiedzieć się, który model powinien mieć zastosowanie, dlatego też obliczenia wykonano wariantowo przy pomocy różnych modeli, a wyniki z najlepszym dopasowaniem funkcji wyjścia do danych pomiarowych zaprezentowano w tabeli (tab. 2). Opierając się na założeniu, że źródła pienińskie drenują jedynie wody strefy aktywnej wymiany, bez dopływu wód starszych niezawierających trytu, we wszystkich modelach przyjęto wartość parametru $\beta = 0$. Parametr ten przedstawia stosunek wydatku dopływu wody starszej (bez trytu lub ze stałym stężeniem) do całkowitego wydatku. Wyjątkiem jest źródło Potoku Kotłowego, gdzie z uwagi na złożony system zasilania uwzględniono również możliwość dopływu wód głębszego krążenia o stężeniu trytu $c\beta$. Wartości β i $c\beta$ w przypadku tego źródła wyznaczono metodą prób i błędów. Pierwsze interpretacje trytowego wieku wód, wykonane na podstawie modelu tłokowego (Humnicki, 2006b, 2007c), wskazywały na stosunkowo krótkie czasy przebywania wody w środowisku skalnym. Dla źródła Potoku pod Wysoki Dział był to okres ok. 9–10 miesięcy, dla źródła Potoku Kotłowego – ok. 4–5 lat, natomiast dla źródła Stuletniego zaledwie ok. 1 miesiąca. Źródło Potoku pod Wysoki Dział i Źródło Stuletnie drenują stosunkowo jednorodne zbiorniki wód podziemnych o charakterze szczelinowym

lub szczelinowo-krasowym. W tym przypadku na migrację znacznika naturalnego, jakim jest tryt, w istotny sposób może wpływać wymiana dyfuzyjna między wodą mobilną płynącą w szczelinach, względnie pustkach krasowych, a wodą stagnacyjną, zawartą w mikroporach matrycy skalnej. Zatem wydaje się, że charakter takiego systemu, a szczególnie złożoność jego przestrzeni hydrogeologicznej, najlepiej powinien opisywać model dyspersyjny (DM). Dobre wyniki powinien dawać również model eksplotacyjny (EM). W przypadku źródła Potoku Kotłowego, ze względu na jego złożony charakter zasilania, najlepsze wyniki powinny zostać uzyskiwane przy zastosowaniu modelu dyspersyjnego (DM) lub kombinowanego (EPM) z uwzględnieniem mieszania wód różnego wieku. Uzyskiwane wyniki rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu lat, z przewagą czasów <30 lat, wskazują, że, niezależnie od przyjętego modelu i sposobu obliczeń, trytowe wieki wód są zdecydowanie dłuższe niż obliczane modelem tłokowym, czy też na podstawie analizy recesji wydatku źródeł. Metody znacznikowe dostarczają bowiem zupełnie innego rodzaju informacji, a uzyskiwany średni czas przepływu znacznika jest z powodu wpływu wody stagnującej w mikroporach matrycy skalnej zawsze dłuższy niż obliczony hydrodynamiczny wiek wody mobilnej opuszczającej szczelinowo-porowy system. Obliczony dla źródeł potoków pod Wysokim Działem i Stuletniego, wiek wód rzędu 50–76 lat wydaje się jednak mało prawdopodobny i z tego powodu, mimo najlepszego dopasowania modelu, opatrzone go w tabeli 2 znakami zapytania. Interpretując uzyskane na podstawie oznaczeń trytowych średnie czasy przepływu wód podziemnych w badanych systemach hydrogeologicznych, należy być bardzo ostrożnym i mieć na względzie stosunkowo nie najlepsze dopasowanie punktów pomiarowych do rozkładu modelowej funkcji wejścia (fig. 2).

Przyczyna takiego stanu rzeczy wynika z kilku elementów: (a) niewielka liczba oznaczeń trytowych, którą autorzy mogli w chwili obecnej przyjąć do modelu, (b) wykonane

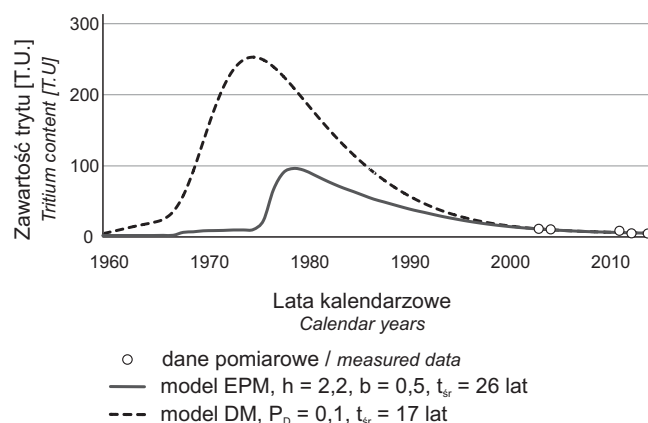


Fig. 2. Zmiany zawartości trytu w wodach drenowanych przez źródło Kotłowego Potoku (porównanie danych empirycznych i symulowanej modelem funkcji wyjścia)

Changes in the tritium content in water drained by the Kotłowy Potok spring (comparison of empirical data and data simulated by the exit function model)

pomiary zawartości trytu znajdują się tylko w końcowej fazie okresu obejmującego funkcję wejścia: w ostatnim ćwierćwieczu obserwuje się konsekwentny spadek zawartości trytu w atmosferze i zbliżanie się jej do wartości zbliżonych do poziomu naturalnego, co powoduje coraz większą niejednoznaczność dopasowania danych modeli; (c) pomiary zawartości trytu w różnych okresach reżimu hydrogeologicznego źródeł.

PODSUMOWANIE

Dotychczasowe wnioski wynikające z rozpoznania reżimu hydrogeologicznego źródeł pienińskich objętych obserwacjami stacjonarnymi jednoznacznie wskazują, że źródła te drenują niewielkie zbiorniki wód podziemnych o charakterze lokalnym. Jednak mimo stosunkowo dobrego rozpoznania dynamiki zmian wydajności i chemizmu, dokładne określenie wieku wód podziemnych drenowanych przez badane źródła napotyka na szereg trudności, a uzyskiwane wyniki są obciążone dużą dozą niepewności. Pierwszą przeszkodą na drodze do dokładnego wyznaczenia czasu przebywania wód w systemie wodonośnym jest stosunkowo słabe rozpoznanie struktury tego systemu. Powodem tego jest niezwykle skomplikowanie budowy geologicznej pienińskiego pasa skałkowego i olbrzymia zmienność litologiczna występujących w obrębie jego struktury utworów. To, że jakieś źródło wypływa z danego typu utworów, nie oznacza bowiem, że obszar zasilania i krążenia wód podziemnych drenowanych przez to źródło jest związany z tym samym typem litologicznym. Drugą trudnością, wynikającą po części z pierwszej, jest fakt, że trudno jest w tego typu szczelinowo-porowym zbiorniku ocenić wpływ dyfuzyjnego przenikania substancji znacznikowej (w tym przypadku trytu) ze szczelin i kanałków aktywnie przewodzących wodę do przestrzeni porowej matrycy skalnej i wynikającego stąd opóźnienia znacznika, gdyż może być on bardzo zróżnicowany przestrzennie, a dodatkowo zmienny w czasie, w zależności od stopnia zawodnienia masywu i tym samym stopnia wykorzystania zróżnicowanych i skomplikowanych dróg krążenia w obrębie różnych typów litologicznych. Kolejna trudność związana jest z obiektywnym faktem konsekwentnego spadku w ostatnich latach zawartości trytu w atmosferze i zbliżanie się jej do wartości naturalnych, charakterystycznych dla okresu przed rozpoczęciem badań nad bronią jądrową i związanych z nimi próbnymi wybuchami powodującymi gwałtowne dostarczanie trytu. Powoduje to coraz większe trudności przy dopasowywaniu modelu, niezależnie od jego rodzaju i przyjętych założeń i w konsekwencji do coraz większej niejednoznaczności wyników. Środkiem zaradczym na ten stan rzeczy wydaje się być poszukiwanie innych metod znacznikowych, przede wszystkim opartych na zawartości atmosferycznych gazów śladowych pochodzenia antropogenicznego.

Praca została wykonana na podstawie wyników badań pozyskanych w ramach: grantu 2011/03/D/ST10/05382, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki, grantu NN 307 264133 finansowanego ze środków Minister-

stwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz prac wykonywanych w ramach realizacji badań statutowych w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Elektroniczne limnimetry z ciągłą rejestracją danych zakupiono ze środków finansowych KBN (grant 5T12B 001 23).

LITERATURA

- BIRKENMAJER K., 1979 – Przewodnik geologiczny po pienińskim pasie skałkowym. Wydaw. Geol., Warszawa.
- BIRKENMAJER K., 2017 – Geologia Pienin. *Monografie Pienińskie*, **3**: 5–66.
- CHOWANIEC J., WITEK K., 1997 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Szczawnica-Krościenko (1050). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DULIŃSKI M., RAJCHEL L., CZOPM., MOTYKA J., RAJCHEL J., 2013 – Badania izotopowe wód mineralnych rejonu Iwonicz-Rymanów. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **456**: 127–132.
- DULIŃSKI M., DEMBSKA-SIEKA P., RAJCHEL L., GORCZYCA Z., 2017 – Zmienność parametrów chemicznych i izotopowych wody z odwiertu Franciszek w Wysowej-Zdroju. *Prz. Geol.*, **11**, 1: 951–955.
- HUMNICKI W., 2006a – Reżim źródeł pienińskich w świetle obserwacji limnimetrycznych. *Pieniny – Przyroda i Człowiek*, **9**: 29–39.
- HUMNICKI W., 2006b – Badania izotopowe źródeł pienińskich. *Pieniny – Przyroda i Człowiek*, **9**: 23–27.
- HUMNICKI W., 2007a – Reżim hydrogeologiczny źródeł pienińskich na przykładzie źródła kontrolnego Balarówka w Tylce. *W: Źródła Polski. Wybrane problemy krenologiczne* (red. P. Jokiel i in.): 85–97. Wyd. Nauk Geogr. UŁ, Łódź.
- HUMNICKI W., 2007b – Znaczenie badań naturalnych wpływów wód podziemnych w rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych górskich obszarów chronionych na przykładzie Pienin. *W: Źródła Polski. Wybrane problemy krenologiczne*. (red. P. Jokiel i in.): 291–299. Wyd. Nauk Geogr. UŁ, Łódź.
- HUMNICKI W., 2007c – Hydrogeologia Pienin. *Dissertationes*, 476. Wydaw. UW, Warszawa.
- HUMNICKI W., 2009 – Geological conditions of groundwater occurrence in the Pieniny Klippen Belt (west Carpathians, Poland). *Stud. Geol. Pol.*, **132**: 39–69.
- HUMNICKI W., 2012a – Analiza recesji wydatku źródła pod Wysokim Działem (Pieniński pas skałkowy) w świetle obserwacji limnimetrycznych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **452**: 79–86.
- HUMNICKI W., 2012b – Analiza recesji wydatku źródeł pienińskich w świetle obserwacji limnimetrycznych. *Pieniny – Przyroda i Człowiek*, **12**: 13–31.
- HUMNICKI W., 2013 – Reakcja wybranych źródeł pienińskich na zasilanie roztopowe. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **456**: 205–210.
- HUMNICKI W., 2015 – Zmiany wydajności monitorowanych źródeł w Pienińskim Parku Narodowym w latach 2003–2014 (pieniński pas skałkowy). *Prz. Geol.*, **10**, 1: 750–755.
- HUMNICKI W., 2017 – Identyfikacja okresów suszy hydrogeologicznej na podstawie obserwacji źródeł w Pienińskim Parku Narodowym (pieniński pas skałkowy) – wyniki wstępne. *Prz. Geol.*, **11**, 2: 1264–1269.
- MAŁECKA D., HUMNICKI W., 2001 – Stan rozpoznania hydrogeologicznego Pienińskiego Parku Narodowego. *W: X Sympozjum „Współczesne problemy hydrogeologii”*, Wrocław: 45–54. Wydaw. Oficyna Wydawnicza Sudety, Wrocław.

- MAŁECKA D., HUMNICKI W., 2002 – Problemy hydrogeologii i ochrony wód Pienińskiego Parku Narodowego. *Pieniny – Przyroda i Człowiek*, 7: 49–70.
- 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., 1996 – Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data. Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrology. IAEA-TEC-DOC-910, IAEA, Vienna: 9–58.
- MAŁOSZEWSKI P., ZUBER A., 1997 – Modele matematyczne i program komputerowy do interpretacji zależności czasowych stężeń trytu i innych znaczników w wodach podziemnych. *W: Sympozjum „Współczesne problemy hydrogeologii” VIII Mat. Symp. Kiekrz k. Poznań: 471–473. Wydaw. Wind., Wrocław.*
- POROWSKI A., 2014 – Isotope hydrogeology. *W: Handbook of engineering hydrology. Fundamentals and applications (red. S. Eslamian). CRC Press, 1: 345–377.*
- PORWISZ B., RADWAN J., CHOWANIEC J., ZUBER A., 2011 – Wody podziemne Piwnicznej Zdroju, ich wieki obszary zasilania, według danych izotopowych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 445: 485–494.
- POSTAWA A., D’OBYRN K., 2013 – Zmiany warunków zasilania wycieku w VI-32 w kopalni soli Wieliczka w świetle wieloletnich badań izotopowych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 456: 465–470.
- SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA M., 2012 – Chemizm wód źródłanych zlewni Potoku Macelowego w Pieninach. *Pieniny – Przyroda i Człowiek*, 12: 31–39.
- SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA M., 2015 – Sezonowa zmienność temperatur wód podziemnych drenowanych przez wybrane źródła w Karpatach wewnętrznych. *Prz. Geol.*, 63, 10/2: 1085–1090.
- SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA M., 2018 – Systemy hydrogeochemiczne zlewni górskich o różnej litologii. Wydaw. UW, Warszawa.
- ZUBER A., 1999 – Interpretacja wieków trytowych wód podziemnych prostymi modelami matematycznymi. *Prz. Geol.*, 47, 6: 571–573.
- ZUBER A. (red.), 2007 – Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych. Poradnik metodyczny. Ofic. Wydaw. PWroc., Wrocław.
- ZUBER A., MAŁOSZEWSKI P., STICHLER W., HERRMANN A., 1986 – Tracer relations in variable flow. *W: 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 – Wieki i położenie obszarów zasilania wód mineralnych Krynicy oszacowane ze zmian czasowych stężeń trytu oraz wartości $\delta^{18}\text{O}$ i δD . *Prz. Geol.*, 47, 6: 574–583.
- ZUBER A., MAŁECKI J.J., DULIŃSKI M., 2008 – Groundwater ages and altitudes of recharge areas in the Polish Tatra Mts. As determined from ^3H , $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ data. *Geol. Quart.*, 52, 1: 71–80.

SUMMARY

Groundwater manifestations on the surface are important especially in mountain areas where the recognition of hydrogeological settings and drinking water resources is very difficult. Particularly important are stationary observations of springs’ discharge in mountainous national parks where any hydrogeological drilling activities are prohibited. Such a situation occurs in the National Park of the Pieniny Mts. which is one of the most valuable natural areas in Poland and Slovakia.

The Pieniny Mts. are part of the the Pieniny Klippen Belt (PKB) which is a distinct geological structure within the Carpathian arc, separating two geologically different parts of the Carpathians: the Inner Carpathians and the Outer Carpathians (Flysch Carpathians). The PKB is among the areas of low groundwater resources where typical useful aquifers cannot be easily distinguished. The groundwater form a single, non-continuous horizon within the weathered and fissured sub-surface zones composed of lithologically different rocks of variable hydrogeological features.

The groundwater reservoir is of fissure-pore type, but the pores of rocks play only a marginal role in the water circulation. The matrix of rocks comprising the Pieniny Klippen Belt is usually impermeable or semi-permeable. Preliminary, singular isotopic analyses of precipitation and groundwater (*i.e.* $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and ^3H) performed in 2003 – 2004 for three representative springs (*i.e.* Pod Wysokim Działem, Kotłowy Stream, Czarny Stream and Stuletnie) indicated that the ori-

gin of water discharged by the spring systems of the Pieniny Mts. is connected with modern infiltration, and the residence time of water in underground environment is relatively short.

This paper presents the results of tritium determinations in four springs located within the Pieniny National Park. All monitored springs are characterized by stable chemical composition, similar hydrochemical water types of $\text{HCO}_3\text{--Ca--Mg}$ and $\text{HCO}_3\text{--Ca}$ and total dissolved solids in the range of 210–420 mg/dm^3 . The attempt of assessing the age of groundwater, *i.e.* the groundwater tritium turnover time in the drained reservoirs, was made using the FLOWPC computer code application. Due to the complex fissure-pore groundwater circulation system and relatively small recharge areas, the most probable results were obtained for dispersion and exponential-piston flow models. Regardless of the assumed model and its parameters, the groundwater age estimations corroborated the relatively young age of studied waters, presumably not exceeding 30 years. This proves that the springs in the Pieniny National Park are recharged mainly by the modern infiltration. One of the main difficulties in applying tritium for groundwater dating is the permanent decrease of its concentration in the atmosphere and approaching natural stable concentration around 5 T.U. characteristic for pre-nuclear bomb testing. This fact causes difficulties in mathematical model fittings despite the assumed model type and flow regime.

