

Wiek i położenie obszarów zasilania wód mineralnych Krynicy oszacowane ze zmian czasowych stężeń trytu oraz wartości $\delta^{18}\text{O}$ i δD

Andrzej Zuber*, Wojciech Ciężkowski**, Jerzy Grabczak***, Marek Duliński***

W Krynicy Zdroju występuje kilka typów wód mineralnych. Wszystkie główne źródła zawierają młodszą komponentę wody z trytem i starszą bez trytu. Wysokość położenia obszarów zasilania znaleziona z wysokościowego efektu izotopowego w kombinacji z wiekami trytowymi pozwoliły w przybliżeniu określić regionalne wartości współczynnika filtracji i objętości systemów drenowanych przez źródła. Odwierty udostępniają wody o wiekach w granicach od wartości porównywalnych z wiekami wód źródłanych (kilkadziesiąt lat) do wieków glacialnych. W niektórych przypadkach uzyskane wieki trytowe nie są jednoznacznie określone przez modele wskutek zbyt dużej liczby dopasowywanych parametrów. Obszary zasilania położone są na wschodniej stronie Krynicyzanki, co oznacza, że dla ich ochrony rozwój uzdrowiska powinien być ukierunkowany na zachodnią stronę.

Słowa kluczowe: Krynica Zdrój, wody mineralne, wieki trytowe, efekt wysokościowy, obszary zasilania

Andrzej Zuber, Wojciech Ciężkowski, Jerzy Grabczak & Marek Duliński — **Tritium ages and altitude of recharge areas of mineral waters in Krynica estimated from tritium, $\delta^{18}\text{O}$ and δD data.** Prz. Geol., 47: 574–583.

S u m m a r y. In Krynica Spa several types of mineral waters occur. All the major springs contain a young component with tritium, and an older, tritium-free, component. The tritium age combined with the altitude of recharge area found from the local altitude effect allowed to determine in approximation the regional values of the hydraulic conductivity and the volume of the systems drained by springs. Wells exploit water with ages ranging from values comparable with those of springs (several tens of years) to glacial ages. In some cases, due to too large number of fitted parameters, it was impossible to obtain an unambiguous interpretation of the tritium age. Recharge areas are situated on the eastern side of the Krynicyzanka stream, which shows that in order to protect them the development of the Spa should be concentrated on the western side.

Key words: Krynica Spa, mineral waters, tritium ages, altitude effect, recharge areas

Niniejsza praca zawiera interpretację wieków wód leczniczych Krynicy przeprowadzoną w ramach projektu celowego KBN i Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej pt.: *Ochrona złoża wód leczniczych w Krynicy wraz z optymalizacją metod wydobycia wody i dwutlenku węgla*, nr 9T2B00896C/2971, zadanie 4 pt.: *Geneza, wiek i obszary zasilania wód leczniczych Krynicy w świetle badań izotopowych*. Podstawowe problemy modelowania opracowano przy częściowej pomocy uzyskanej w ramach *Coordinated Research Programme (CRP)* pt.: „*Use of isotopes for analyses of flow and transport dynamics in groundwater systems*” Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA). Interpretację przeprowadzono za pomocą prostych modeli matematycznych z wykorzystaniem danych opadowych ze stacji obserwacyjnych w rejonie Krynicy. Modele te pozwalają określić wiek wód, tzn. dla trytu jest to średni czas jaki upłynął od momentu infiltracji oraz rozkład czasów przepływu (Zuber, 1999).

Pośród wielu metod znacznikowych metoda trytowa jest praktycznie jedyną, mającą zastosowanie do określania wieku wód bogatych w CO_2 . Dla systemów, które można przybliżyć tzw. modelem przepływu tłokowego, przy założeniu, że wszystkie linie przepływu mają tę samą długość i prędkość oraz nie zachodzi dyspersja, metoda ta pozwala określić jedynie wiek wód zasilanych po 1952 r., tzn. po rozpoczęciu prób termojądrowych w atmosferze. Dla systemów z rozkładem czasu przepływu od zera („nie-

skończenie” krótkie czasy) do nieskończoności, stosuje się model eksponencjalny (tzn. czasy przepływu wód są opisane funkcją eksponencjalną), którym teoretycznie można określić wiek wód wynoszący nawet ok. 1000 lat. Przykład interpretacji wieku wód takiego rzędu można znaleźć w pracy Ciężkowskiego i Zuber (1996). Pośrednie modele pozwalają najczęściej określać średni wiek do ok. 200 lat.

Jak już wspomniano, w porównaniu z innymi wodami, szczytawy mają bardzo ograniczone możliwości określenia wieku, gdyż metoda ^{14}C zawodzi wskutek rozcieńczenia radiowęglu przez „martwy” węgiel w CO_2 , a metody gazów szlachetnych zawodzą wskutek separowania się rozpuszczonych gazów od wody zarówno w złożu jak i na wypływach.

Dla wód starszych niż 10 tys. lat, zróżnicowanie zawartości poszczególnych izotopów trwałych tlenu i wodoru w cząsteczkach wody daje dodatkową możliwość określenia wieku w znaczeniu okresu geologicznego (Grabczak & Zuber, 1983), gdyż skład izotopowy przedholoceńskich wód infiltracyjnych w danym rejonie zależy głównie od klimatu w jakim zachodziło zasilanie.

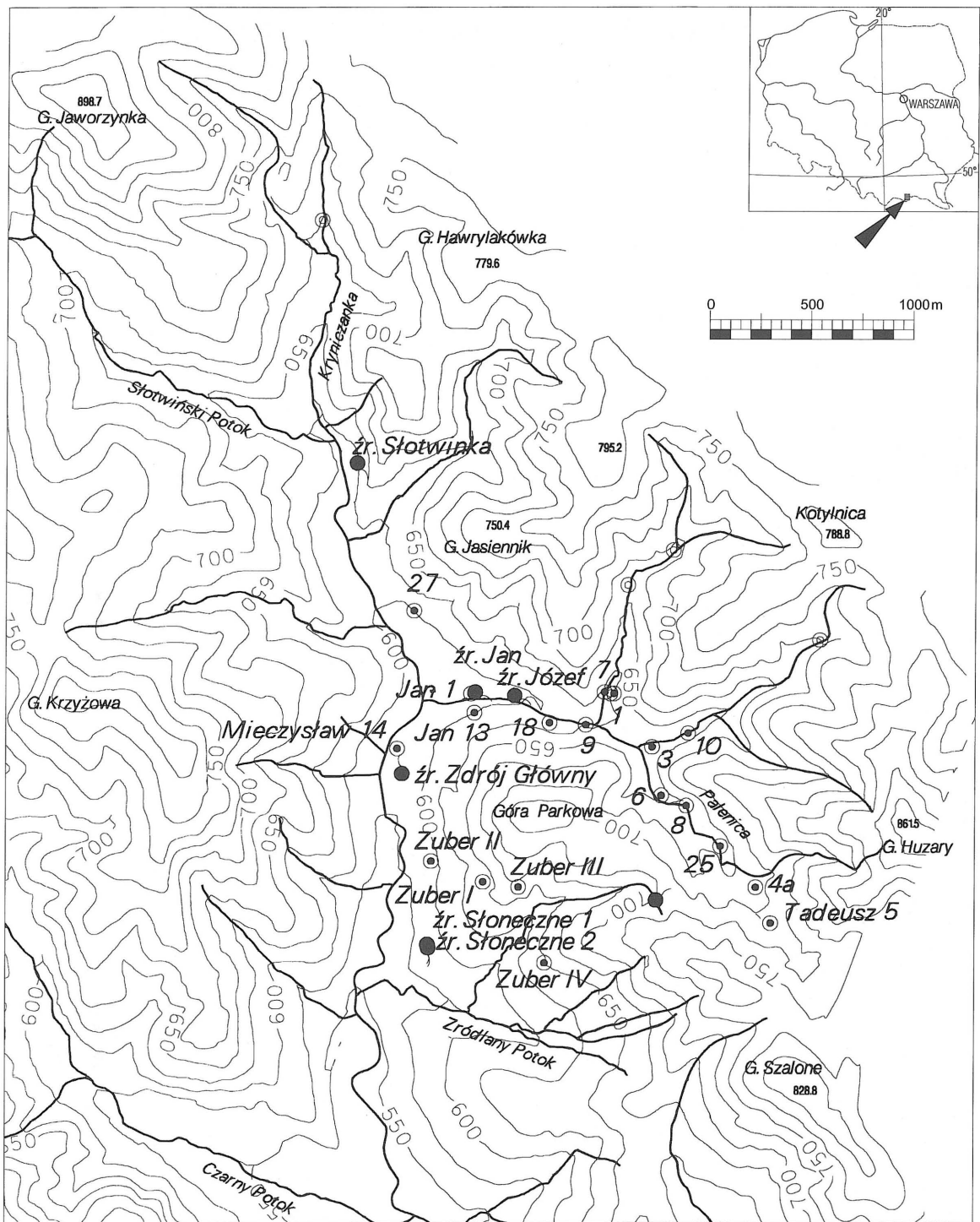
Dla wód holoceńskich, a więc także wód współczesnych, zdefiniowanych jako wody zawierające tryt, skład izotopowy wody w obszarach górskich jest zazwyczaj interpretowany jako zależny od średniej wysokości na jakiej zachodzi zasilanie danego systemu wodonośnego. Efekt wysokościowy w centralnej części polskich Karpat, znaleziono dwukrotnie opróbowując w różnych okresach roku 25 ujęć wody, dla których dzięki podszczytowym położeniom było możliwe łatwe określenie wysokości ich obszarów zasilania. Otrzymano następującą „lokalną” linię wód infiltracyjnych (Ciężkowski & Zuber, 1995):

$$\delta\text{D} = (5,86 \pm 0,47)\delta^{18}\text{O} - (11,26 \pm 4,87), \quad r = 0,934 \quad [1]$$

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

**Zakład Geologii i Wód Mineralnych, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego, 50-370 Wrocław

***Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej, AGH, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków



Ryc. 1. Morfologia obszaru badań i usytuowanie ujęć wód mineralnych Krynicy.

Fig. 1. Morphology of the investigated area and position of springs and wells with mineral water

gdzie: r — jest współczynnikiem korelacji.

Te same wyniki analiz posłużyły do wyznaczenia funkcji $H = f(\delta^{18}O)$ i $H = f(\delta D)$:

$$H = -(320,7 \pm 60,4)\delta^{18}O - (2630,0 \pm 627,1) \quad r = -0,742 \quad [2]$$

$$H = -(34,6 \pm 12,4)\delta D - (1791,7 \pm 895,4) \quad r = -0,502 \quad [3]$$

gdzie:

H — jest średnią wysokością położenia obszaru zasilania w m n.p.m., a delty są wyrażone w promilach. Natomiast funkcje $\delta = f(H)$ mają postać:

$$\delta^{18}O = -(0,00172 \pm 0,000323)H - (9,18 \pm 0,24), \quad r = -0,742 \quad [4]$$

$$\delta D = -(0,00728 \pm 0,00262)H - (66,9 \pm 1,9), \quad r = -0,502 \quad [5]$$

Z powyższych wzorów widać, że efekt wysokościowy dla wód zwykłych obarczony jest dużym błędem, a współczynniki korelacji są bardzo niskie dla wszystkich podanych funkcji. Dodatkowy problem polega na właściwym wyborze rodzaju funkcji stosowanej dla określenia wysokości położenia obszaru zasilania. Ciężkowski i Zuber (1995) uznali linie dwusieczne odpowiednio dla

Tab. 1. Parametry modeli dopasowanych do danych trytowych ujęć Krynicy

L.p.	Ujęcie	Okres obserwacji	Liczb analiz	Model	β (-)	Wiek (lata)	η (-)	D/vx (-)	Skl. Stałe (mg/dm ³)	Gł. lub filtr (m)
Wody typu HCO ₃ -Ca										
1	Słoneczne 1	1995	2	EM	0,00	6,6	-	-	2750	ok. 4
2	Słoneczne 2	1995	2	EM	0,00	12,3	-	-	1850	ok. 3
3	Jan	1973-97	13	EM	0,30	11	-	-	700	0,66
				EPM	0,30	15	1,07			
4	Józef	1977-97	5	EPM	0,30	28,6	1,07	-		1,06
5	K-1	1986-97	4	EPM	0,43	30,5	1,07	-	1250	169-189
6	K-7	1986-97	4	EPM	0,40	28	1,05	-	1230	87-210
				EPM	0,00	75	1,05			
7	Zdr. Główny	1973-97	12(3)	DM	0,80	50	-	0,50	2630	2,3
				EPM	0,75	65	1,10			
8	K-6	1986-97	4	DM	0,15	65	-	0,50	1130	132-157
				DM	0,00	77	-			
Wody typów HCO ₃ -Ca \cong Mg, HCO ₃ -Ca-Mg i HCO ₃ -Mg -Ca										
9	Słotwinka	1973-97	9	EM	0,80	14	-	-	4090	4,2
10	K-9	1973-97	9	DM	0,50	86	-	0,50	4370	169-189
11	K-14, Miecz.	1973-97	9	EPM	0,00	212	1,04	-	4290	51-56
				EPM	0,50	110	1,07			
				EPM	0,60	78	1,13			

EM — model eksponencjalny, EPM — model tłokowo-eksponencjalny, DM — model dyspersyjny.

W nawiasie podano liczbę odrzuconych analiz w okresie awarii Zdroju Głównego

wzorów 2 i 4 oraz 3 i 5 jako najbardziej wiarygodny sposób wyznaczenia wysokości. Ten sposób interpretacji zwany jest w dalszej części pracy metodą regionalną z gradientami $\Delta\delta^{18}\text{O}/\Delta H = -0,23\text{‰}/100\text{ m}$ i $\Delta\delta\text{D}/\Delta H = -1,7\text{‰}/100\text{ m}$, będącymi w granicach typowych wartości podawanych w literaturze światowej a wynoszącymi od $-0,15\text{‰}$ do

$-0,5\text{‰}/100\text{ m}$ dla tlenu i od -1‰ do $-4\text{‰}/100\text{ m}$ dla wodoru (Gat & Gonfiantini, 1981). Gradienty te są także zbliżone do wartości otrzymanych w Sudetach, tzn. odpowiednio $-0,17\text{‰}/100\text{ m}$ i $-1,15\text{‰}/100\text{ m}$ (Ciężkowski & Kryza, 1989).

Tab. 2. Rzędne wysokościowe ujęć, składy izotopowe wody i średnie wysokości obszarów zasilania

L.p.	Ujęcie	Rzędna wys. [m n.p.m.]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	δD [‰]	Metoda regionalna [m n.p.m.]	Metoda lokalna [m n.p.m.]
1	Słoneczne 1	561,8	-10,23	-70,5	640/610	660/640
2	Słoneczne 2	581,4	-10,2	-73,3	620/770	660/710
3	Jan A	578,3	-10,62	-73,5	800/780	720/710
	Jan B		-10,44	-72,9	720/740	700/700
	Jan C		-10,38	-73,0	700/750	690/700
4	Józef	588,6	-10,7	-74,0	830/820	740/720
5	K-1	616,1	-10,7	-74,7	830/840	740/740
6	K-7	617,1	-10,65	-74,0	810/820	730/720
7	Zdr. Główny	578,3	-10,63	-72,6	800/730	730/690
8	K-6	637,0	-10,67	-73,1	820/760	730/700
9	Słotwinka	610,0	-10,85	-74,6	900/840	760/740
10	K-9	602,6	-11,12	-78,75	-	800/830a
11	K-14, Miecz.	571,1	-10,95	-77,0	-	780/790a
12	K-3	625,9	-10,55	-72,5	780/720	710/690
13	K-4a	685	-10,6	-71	800/640	720/660
14	K-5, Tadeusz	704,2	-10,42	-72,0	720/700	690/680
15	K-8	646,0	-10,17	-70,67	610/620	650/650
16	K-25	665	-11,6	-79	-	950/840a
17	K-27	605	-11,0	-77	-	780/790a
18	K-10	635,0	-12,27	-85,87	-	990/990b
19	K-18	612,3	-11,00	-77,25	-	780/800a

Wysokości obszarów zasilania wyznaczone wg wartości $\delta^{18}\text{O}$ i δD metodą regionalną wg Ciężkowskiego i in. (1996); a — wody zawierające przypuszczalnie domieszkę wody glacialnej (tzn. zasilanej w okresie glacialnego klimatu); b — woda glacialna

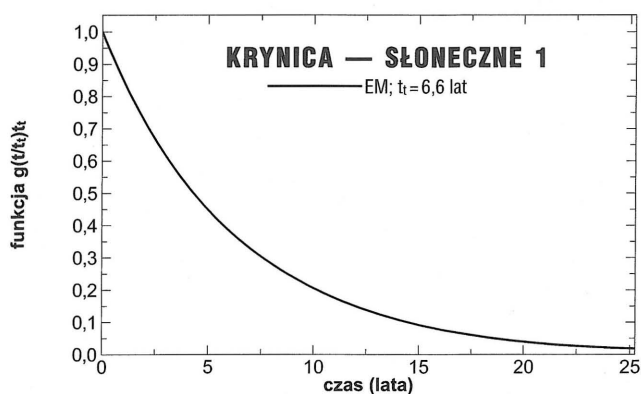
W przeciwieństwie do wód sudeckich tak wyznaczony efekt wysokościowy, w niektórych uzdrowiskach karpaccich, daje wysokości położenia obszarów zasilania trudne do pogodzenia z morfologią, geologią i wiekami trytowymi. Z powyższych względów podjęto próbę wyznaczenia efektu lokalnego dla Krynicy na podstawie dwukrotnego oznaczenia składów izotopowych trzech małych źródeł. Dla źródła Miłość na wschodnim stoku Góry Parkowej ($\delta^{18}\text{O} = -10,52$ ‰ i $\delta\text{D} = -73,0$ ‰) założono wysokość 705 m, dla niżej położonej Bocianówki ($\delta^{18}\text{O} = -10,61$ ‰ i $\delta\text{D} = -74,25$ ‰) obszar zasilania jest położony wyżej,

ale poniżej szczytu, co daje ok. 725 m, a dla źródła bez nazwy ($\delta^{18}\text{O} = -10,16$ ‰ i $\delta\text{D} = -70,9$ ‰) założono 645 m, uzyskując następujące przybliżone wzory:

$$H = -174,8\delta^{18}\text{O} - 1132 \quad [6]$$

$$H = -22,7\delta\text{D} - 957 \quad [7]$$

Warto zaznaczyć, że wzór 7 daje zbliżone wysokości obszarów zasilania do sposobu opartego na zupełnie



Ryc. 2. Rozkład czasów przepływu znacznika dla źr. Słoneczne 1 — jest to funkcja eksponencjalna z niskim średnim wiekiem przepływu znacznika

Fig. 2. Residence time distribution function for Słoneczne 1 Spring — it is an exponential function with low mean residence time (age)

Tab. 3. Parametry hydrogeologiczne badanych źródeł wód mineralnych

Ujęcie	Wiek [lata]	Udział [%]	H [m n.p.m.]	x [m]	k [m/s]	V _w [m ³]	V _r [m ³]
Słoneczne	9	100	660	350	5×10 ⁻⁷	0,15×10 ⁵	0,15×10 ⁶
Jan	13	70	630	250	3×10 ⁻⁷	0,7×10 ⁵	0,7×10 ⁶
Składowa z trytem	≥45	30	710	750	≤3×10 ⁻⁷	≥1,0×10 ⁵	1,0×10 ⁶
Józef	29	70	680	400	2×10 ⁻⁷	0,4×10 ⁵	0,4×10 ⁶
Składowa z trytem	≥130	30	730	1100	≤2×10 ⁻⁷	≥0,8×10 ⁵	0,8×10 ⁶
Zdrój Główny	50	20	650	400	1,×10 ⁻⁷	0,2×10 ⁵	0,2×10 ⁶
Składowa z trytem	≥320	80	710	1400	≤1,5×10 ⁻⁷	≥4,9×10 ⁵	4,9×10 ⁶
Składowa bez trytu							
Słotwinka	14	20	660	250	3×10 ⁻⁷	0,1×10 ⁵	0,1×10 ⁶
Składowa z trytem	≥75	80	750	1000	×10 ⁻⁷	≥2×10 ⁵	2×10 ⁶
Składowa bez trytu							

Wartości k dla składowych bez trytu założone są jako nie większe niż dla składowych z trytem, co w efekcie pozwala obliczyć graniczne (najniższe) wieki i objętości dla składowych bez trytu. Obliczenia k i V_r przeprowadzono dla założonej mikroporowatości ok. 0,10

innych zasadach i zastosowanego dla Krynicy w pracy Dulińskiego i in. (1987). Ze wzorów 6 i 7 wynikają gradienty $\Delta\delta^{18}\text{O}/\Delta H = -0,63\text{‰}/100\text{ m}$ i $\Delta\delta\text{D}/\Delta H = -4,4\text{‰}/100\text{ m}$, będące blisko podanych wyżej wartości literaturowych. Powyższe wzory wymagają jeszcze weryfikacji w trakcie dalszych badań.

Należy jeszcze dodać, że wiarygodna interpretacja wysokościowa dla wód mieszanych jest w zasadzie bardzo utrudniona, a czasem nawet niemożliwa. Dla przykładu, dla wód zawierających dwie komponenty: wodę młodszą z trytem i wodę starszą bez trytu, mające w założeniu różne składy izotopowe (oznaczone odpowiednio jako δ_y i δ_o), możemy przedstawić skład izotopowy wody mieszanej (δ_m) jako:

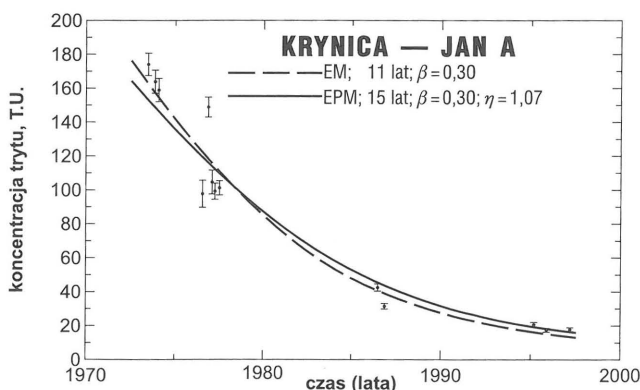
$$\delta_m = (1 - \beta) \times \delta_y + \beta \times \delta_o \quad [8]$$

gdzie:

β — jest stosunkiem wydatku wody starszej do całkowitego wydatku dopływu. Skład izotopowy wody

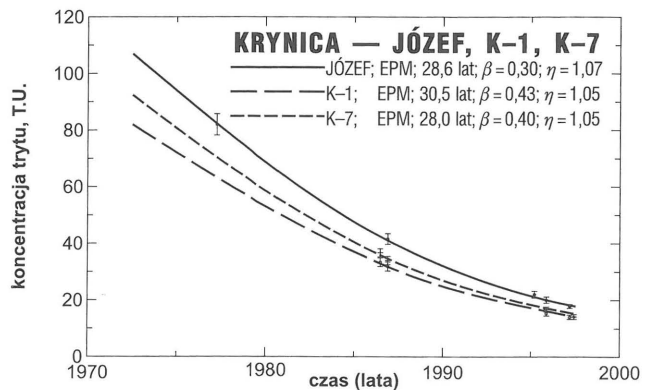
mieszanej (δ_m) jest wartością mierzona, a składy izotopowe wód biorących udział w mieszaniu pozostają zazwyczaj nieznanne (dwie niewiadome w jednym równaniu). Współczynnik β jest często znajduwany z interpretacji danych trytowych i jeżeli jest on bliski jedności, lub bliski zeru, można w przybliżeniu uważać, że woda mieszana reprezentuje skład izotopowy dominującej komponenty, a więc i jej wysokość położenia obszaru zasilania.

Dla niektórych ujęć Krynicy pierwsze analizy trytu były wykonane już w 1973 r. dla Instytutu Nauk Geologicznych PAN (nie publikowane — udostępnione przez J. Dowgiałę), będące rozszerzeniem wcześniej zainicjowanych w Polsce badań składu izotopowego wód leczniczych Polski południowej (Dowgiało, 1973). Bardziej systematyczne i kompletne oznaczenia zarówno trytu, jak i składów izotopowych tlenu i wodoru w cząsteczkach wody zostały wykonane dopiero w 1986 r. (Duliński i in., 1987) oraz w latach 1995–1997. Niniejsza praca jest oparta o dane zebrane w opracowaniu Ciężkowskiego i in. (1996)



Ryc. 3. Stężenia trytu mierzone w wodzie ze źródła Jan A i dwa dopasowane modele. Znaczny rozrzut punktów wynika przypuszczalnie ze zmian wartości współczynnika β

Fig. 3. Tritium concentration measured in Jan A spring, and two fitted models. Significant scatter results from variations of the coefficient β



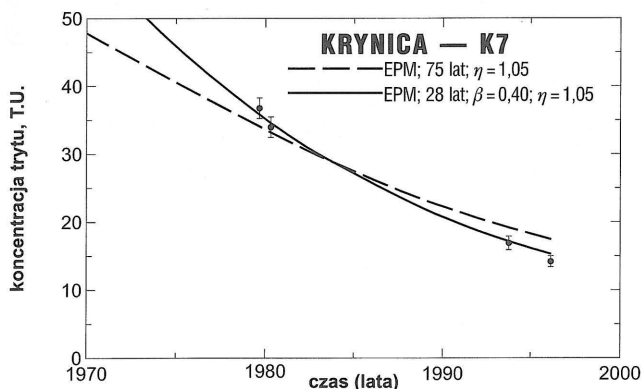
Ryc. 4. Stężenia trytu mierzone w wodach ze źródła Józef oraz odwiertów K-1 i K-7 wraz z dopasowanymi modelami i ich parametrami

Fig. 4. Tritium concentrations measured in Józef spring, K-1 and K-7 wells with two fitted models

oraz na pomiarach wykonanych w ramach realizowanego projektu celowego. Dla większości ujęć, prezentowane tutaj rezultaty nowszej interpretacji, dobrze zgadzają się z poprzednimi rezultatami zawartymi w wymienionym opracowaniu. Dla niektórych ujęć nowsze badania doprowadziły do uściślenia interpretacji i uzyskania bardziej wiarygodnych wartości parametrów poprzez wyeliminowanie niektórych modeli interpretacyjnych.

Wody mineralne Krynicy można podzielić za Świdzińskim (1972) na szczawy zwykłe, będące całkowicie wodami infiltracyjnymi o bardzo zróżnicowanych wiekach, i szczawy chlorkowe (zuber). Poza Słotwinką, wszystkie źródła (Słoneczne 1 i 2, Źródło Główne, Józef i Jan) oraz wiele odwiertów (1, 3, 4a, 5–8 i 25) mają wody typu $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Wody $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ i $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ występują w odwiertach 9, 10, 14 i 18 oraz w Słotwince ($\text{HCO}_3\text{-Ca}\cong\text{Mg}$, co oznacza okresowe przeważanie jonu Ca^{2+} nad Mg^{2+} lub odwrotnie). Wody zuber, mają bezsporną komponentę infiltracyjną, jednak o spornym wieku i obszarach zasilania oraz komponentę nieinfiltracyjną, której pochodzenie stanowi przedmiot kontrowersji, nieistotnych jednak dla przedmiotu niniejszej pracy. Wody te nie są dyskutowane bliżej ze względu na znaczny wiek składowej infiltracyjnej, przekraczający zakres metody trytowej o kilka rzędów wielkości.

Rezultaty interpretacji wieków trytowych można podzielić na kilka grup w pewnym stopniu związanych z typem hydrochemicznym wody i mineralizacją. W tab. 1 są zebrane parametry modeli uzyskane z interpretacji (oczywiście jedynie dla ujęć zawierających wody z mierzalnymi stężeniami trytu), a także sumy składników stałych i głębokości położenia filtrów. W tab. 2 natomiast podane są rzędne wysokościowe badanych ujęć, średnie składniki izotopowe wody oraz średnie wysokości położenia obszarów zasilania znalezione metodą regionalną (wg Ciężkowskiego i in., 1996) i lokalną. Na ryc. 1 jest pokazana morfologia terenu i są zaznaczone badane ujęcia.



Ryc. 5. Stężenia trytu mierzone w wodzie z otw. K-7 i dwa dopasowane modele. Widoczne jest wyraźnie gorsze dopasowanie w przypadku założenia $\beta = 0$, tzn. nie występowania dwu różnych komponent dopływu

Fig. 5. Tritium concentration measured in K-7 well. Under an assumption of $\beta = 0$ (i.e., for one flow component) a significantly worse fit is obtained

Rezultaty badań

Wody $\text{HCO}_3\text{-Ca}$

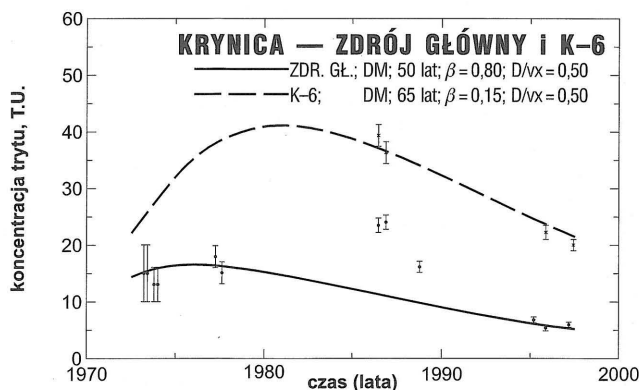
Źródła Słoneczne 1 i 2 (wydatki 0,06 i 0,09 m^3/h).

Tryt w wodach z tych ujęć jest opisany dobrze najprostszym modelem eksponencjalnym (EM), ze średnimi czasami przepływu (t_t) odpowiednio 6,6 i 12,3 lat. Z rozkładu czasów przepływu dla Słonecznego 1 (ryc. 2) wynika, że zgodnie z typem modelu dominują bardzo krótkie czasy przepływu. Są to więc wody bardzo podatne na zanieczyszczenia antropogeniczne. Obie metody wysokościowe dały zbliżone wartości średnich wysokości obszaru zasilania, położonego blisko miejsc wypływu (tab. 2), co jest zgodne z niskim wiekiem trytowym. Obszar zasilania tych źródeł znajduje się więc bezpośrednio nad miejscami wypływu na południowo-zachodnim stoku Góry Parkowej. Ze względu na zanieczyszczenia antropogeniczne źródło Słoneczne 1 (ul. Słoneczna 15) zostało już zamknięte, Słoneczne 2 (ul. Słoneczna 16b) natomiast jest jeszcze czynne, ale ze względu na stosunkowo krótkie czasy dopływu i eksponencjalny typ modelu jest ono podatne na zanieczyszczenia antropogeniczne.

Stosując podany przez Zuberę (1999) wzór na średnią wartość współczynnika filtracji (k) i biorąc średni wiek trytowy (t_t), wynoszący dla obu źródeł ok. 9 lat, otrzymujemy następujący wynik:

$$k \cong n_p \cdot x / it_t = 0,1 \times 350 \text{ m} / [(660-570)/350] \times 9 \text{ lat} (365 \text{ d/r}) (86400 \text{ s/d}) = 5 \times 10^{-7} \text{ m/s} \quad [9]$$

gdzie: n_p — jest porowatością bloków skalnych (jest to wielkość złożona, w przybliżeniu równa całkowitej porowatości), x — jest średnią odległością źródeł od środka obszaru zasilania, a „ i ” — jest średnim gradientem hydraulicznym na drodze przepływu, w przybliżeniu przyjętym zgodnie z morfologią. Łatwo zauważyć, że dla innych założonych (lub oszacowanych) wartości n_p , i , lub x , współczynnik filtracji (k) ulega proporcjonalnej zmianie.



Ryc. 6. Stężenia trytu mierzone w wodzie Zdr. Głównego i otworu K-6 oraz dopasowane modele. Dla Zdr. Głównego rezultaty z okresu bezpośrednio po awarii nie są zgodne z pozostałymi i muszą być pominięte

Fig. 6. Tritium concentrations in the Main Spring and K-6 well with fitted models. Results obtained after the outflow from a fresh-water pipeline have to be rejected

Wartości x oraz i zostały oszacowane według lokalnej wysokości obszaru zasilania i mapy topograficznej. Przy stosowaniu wieku trytowego we wzorze 8 należy pamiętać, że wiek ten obejmuje także czas infiltracji przez strefę nienasyconą, a więc dla bardziej dokładnych oszacowań przepływu poziomego przez strefę nasyconą może zachodzić konieczność odjęcia czasu infiltracji od wieku trytowego.

Summaryzna objętość systemu skalnego (V_r) drenowanego przez źródła Słoneczne wynosi ok. $0,15 \times 10^6 \text{ m}^3$, według oszacowania ze wzoru: $V_r = Q_1 \times t_{i1} / n_p + Q_2 \times t_{i2} / n_p$ (Zuber, 1999), gdzie Q_i i t_{ii} oznaczają odpowiednio wydatki i wieki dla źródła 1 i 2. Parametry otrzymane dla źródeł Słonecznych są zestawione razem z parametrami otrzymanymi dla pozostałych źródeł w tab. 3. Należy przy tym pamiętać, że dokładność tak wyznaczonych parametrów przypuszczalnie nie jest lepsza niż $\pm 50\%$. Dla źródeł i ujęć dyskutowanych dalej, interpretacja wieków trytowych i położenia obszarów zasilania nie jest już tak prosta i jednoznaczna jak w przypadku źródeł Słonecznych.

Źródło Jan ($Q = 0,84 \text{ m}^3/\text{h}$). Na ujęciu Jan składają się trzy ujęcia A, B i C, które przeważnie były opróbowywane oddzielnie, wykazując zróżnicowania stężeń trytu. Interpretując jednak wyniki dla całego okresu obserwacji otrzymuje się prawie takie same modele. Dlatego więc, w niniejszej pracy ograniczono się jedynie do podania wyników modelowania dla Jana A (ryc. 3). Oba dopasowane modele, tj. eksponencjalny (EM) i eksponencjalno-tłokowy (EPM), pokazują na dominujący udział wody z trytem wobec ok. 30% wody bez trytu ($\beta = 0,30$), chociaż ich równorzędne dopasowanie świadczy o pewnej niejednoznaczności. Model typu EPM z $\eta = 1,07$ pokazuje na możliwość braku linii przepływu o „nieskończenie” krótkich czasach dopływu, co oznacza, że blisko ujęcia zwierciadło wody jest napięte. Duży rozrzut zmierzonych stężeń trytu w stosunku do teoretycznych krzywych dopasowanych modeli świadczy o znacznych wahaniami czasowych wartości współczynnika β , tzn. składowe dopływy mają zmienne proporcje. Stosunkowo krótkie średnie wieki składowej z trytem (11–15 lat) oraz znaczne prawdopodobieństwo ade-

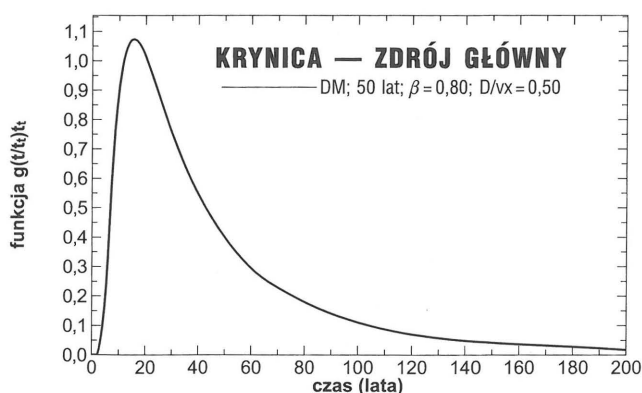
kwatności modelu EM, lub EPM z niską wartością parametru η , wskazują na znaczną podatność tego ujęcia na zanieczyszczenia.

Zakładając, że obszar zasilania dominującej składowej z trytem jest wyraźnie poniżej oszacowanej średniej wartości ok. 700 m n.p.m. (tab. 2), tzn. na ok. 630 m, otrzymuje się ze wzoru 9 współczynnik filtracji wynoszący ok. $(0,1 \times 250) / [(50/250)13 \times 365 \times 86400] = 3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. Objętość systemu skalnego drenowanego przez składową z trytem wynosi $V_r = (1 - \beta) \times Q \times t_i / n_p = 0,7 \times 10^6 \text{ m}^3$. W tab. 3 podano także graniczne oszacowania dla składowej bez trytu przeprowadzone w sposób opisany dalej dla Zdroju Głównego.

Eksponencjalny typ modelu sugeruje, że obszar zasilania składowej z trytem zaczyna się blisko ujęcia, co razem ze stosunkowo krótkim czasem przepływu świadczy o podatności tego ujęcia na zanieczyszczenia antropogeniczne. Obszar zasilania składowej bez trytu znajduje się wyżej na południowych Jasiennika, i/lub wzdłuża 795.

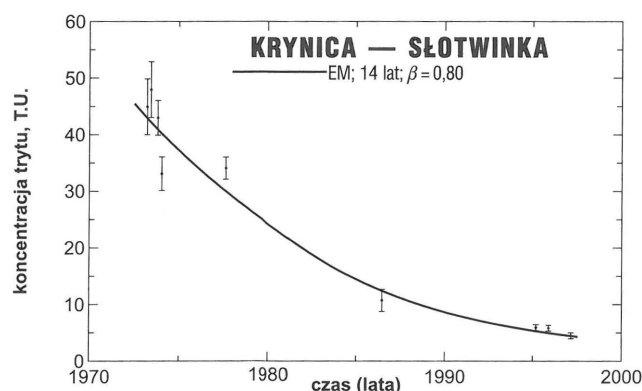
Źródło Józef ($Q = 0,23 \text{ m}^3/\text{h}$) oraz odwierty K-1 i K-7. Na ryc. 4 są pokazane dopasowane modele typu EPM dla tych ujęć. Dominuje dopływ wody z trytem, z obecnością ok. 30 % wody bez trytu ($\beta = 0,30$) w Józefie i ok. 40 % w K-1 i K-7. W przypadku źródła Józef prawie idealne ułożenie wyników analiz na krzywej teoretycznej świadczy o dobrze ustabilizowanych warunkach dopływu o napiętym charakterze zwierciadła wody blisko ujęcia ($\eta = 1,07$). Należy zauważyć, że odwierty, mające stosunkowo znaczną głębokość, charakteryzują się podobnymi parametrami jak wypływ naturalny. Rozpatrywane trzy ujęcia leżą blisko siebie, a ich składy izotopowe są prawie identyczne (tab. 2). Oszacowanie parametrów hydrogeologicznych zawarte są w tab. 3.

Dla odwiertu K-7 można w grubym przybliżeniu dopasować także model mający $\beta = 0,00$ (ryc. 5 i tab. 1). Model ten daje wyobrażenie o całkowitej wartości wieku ok. 2 razy większej niż wiek składowej z trytem w modelu z $\beta = 0,40$. W tym przypadku wiek składowej starszej (bez trytu) można oszacować przybliżonym wzorem, jak niżej: $t_i(\text{całk.}) = (1 - \beta) \times \beta t_i(\text{tryt.}) + \beta \times t_i(\text{beztryt.}) \cong 150 \text{ lat}$.



Ryc. 7. Rozkład czasów przepływu dla Zdroju Głównego, pokazujący istnienie krótkich czasów przepływu pomimo modelu typu DM i znacznej wartości średniego wieku (ok. 50 lat)

Fig. 7. Residence time distribution function for the Main Spring, which is showing the existence of flow lines with short travel times, in spite of a large mean age (about 50 years)



Ryc. 8. Stężenia trytu mierzone w wodzie Słotwinki i dopasowany model. Znaczny rozrzut punktów wynika przypuszczalnie ze zmian wartości współczynnika β

Fig. 8. Tritium concentration measured in Słotwinka spring, and the fitted model. Significant scatter probably results from variations of the coefficient β

Obszary zasilania ujęć Józef, K-1 i K-7 znajdują się przypuszczalnie na południowych stokach Jasiennika i wzgórza 795.

Zródło Główne ($Q = 2,1 \text{ m}^3/\text{h}$) i odwiert K-6. Na ryc. 6 są pokazane dopasowania modeli typu DM dla tych ujęć. W Zdroju Głównym składowa bez trytu wynosi aż 80%, podczas gdy w K-6 najwyżej ok. 15%. Rozrzut punktów w zasadzie nie przekracza $\pm 2\sigma$, a więc proporcje mieszania się obu składników są przypuszczalnie stałe. W przypadku Zdroju Głównego trzy punkty odbiegające od krzywej teoretycznej pochodzą z okresu po awarii sąsiadującego z ujęciem rurociągu z wodą słodką. Dopasowany model typu DM, mimo znacznej wartości średniego wieku (50 lat), charakteryzuje się także obecnością linii przepływu o czasach kilku lat (ryc. 7). Alternatywnie można założyć, że rozrzut punktów jest związany ze zmiennym β . Wtedy dopasowany model EPM ma zbliżone właściwości do modelu DM (tab. 1), co sugeruje generalną poprawność interpretacji, gdyż podobne wyniki uzyskane są różnymi modelami.

Otrzymana średnia wysokość obszaru zasilania dla Zdroju Głównego (690–730 m wg tab. 2) sugeruje jego położenie na szczycie Góry Parkowej, co nie jest zgodne ze stosunkowo znacznym wydatkiem tego ujęcia, wynoszącym ok. $2,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Natomiast otrzymany model oraz spadek mineralizacji w czasie awarii rurociągu z wodą słodką (Duliński i in., 1987) świadczą o przynajmniej częściowym zasilaniu lokalnym. Tak więc, należy przyjąć, że składowa z trytem pochodzi z zasilania na zachodnim zboczu Góry Parkowej, a składowa bez trytu ze znacznie dalszej odległości z kierunku południowo-wschodniego, z kierunku G. Szalone. W takim przypadku można założyć, że zasilanie lokalne zachodzi na średniej wysokości ok. 650 m (wyraźnie niżej niż podana w tab. 2 wartość dla całkowitego dopływu) i wtedy $k = (0,1 \times 400) / [(70/400) \times 50 \times 365 \times 86400] = 1,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. Natomiast dla składowej dalekiego zasilania można przyjąć nieco inne położenie obszaru zasilania zgodnie z tab. 2, tzn. na ok. 710 m n.p.m. Przyjmując, że współczynnik filtracji w systemie prowadzącym wodę dalekiego zasilania nie może być wyższy niż w płytszym systemie lokalnym, tzn. $1,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, i odwracając obliczenia, ale dla parametrów przepływu dalekiego, otrzymuje się wiek wynoszący co najmniej 320 lat, jako wiek składowej bez trytu ($t_f = n_p \times i/k = 0,1 \times 1400 \text{ m} / [(130/1400) \times (\leq 1,5 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}) \times 86400 \text{ (s/d)} \times 365 \text{ (dni/r)}] \geq 320 \text{ lat}$).

Dla podanego oszacowania wieku składowej bez trytu, objętość wody w systemie zasilającym Zródło Główne wynosi: $V_w = Q[(1 - \beta)t_{t1} + \beta t_{t2}] = 2,1 \text{ m}^3/\text{h} \times [0,2 \times 50 + 0,8 \times (\geq 320)] \text{ lat} \geq 5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Natomiast objętość systemu skal-

nego wynosi $V_s \cong V_w/n_p \geq 50 \times 10^6 \text{ m}^3$. Takie same objętości są np. zawarte w prostopadłościanie o wymiarach $1500 \times 500 \times 63 \text{ m}$, co jest do przyjęcia, biorąc pod uwagę położenie i odległość przypuszczalnego obszaru zasilania składowej starszej. Spójność powyższych rozważań można w pewnym stopniu zweryfikować. Mianowicie, przepływ składowej bez trytu przez podany powyżej przekrój poprzeczny systemu skalnego wynosi:

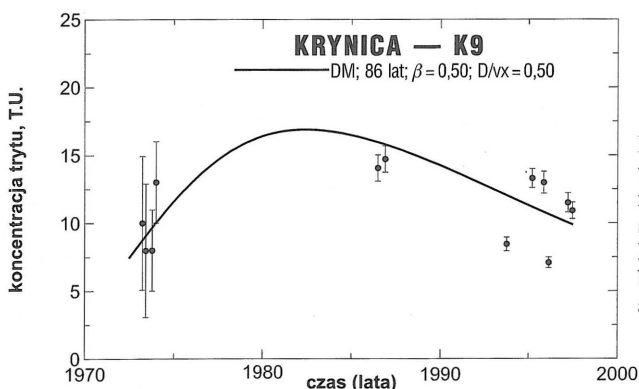
$$Q = S \times v_f = S \times i/k = 500 \text{ m} \times 63 \text{ m} \times (130 \text{ m}/1400 \text{ m}) \times (\leq 1,5 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}) \times 3600 \text{ (s/h)} \geq 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

co po dodaniu dopływu składowej z trytem, wynoszącej $0,2 \times 2,1 = 0,4 \text{ m}^3/\text{h}$, doskonale zgadza się z rzeczywistym wydatkiem Zdroju Głównego ($2,1 \text{ m}^3/\text{h}$), zwłaszcza uwzględniając podaną wcześniej dokładność oszacowań wynoszącą ok. $\pm 50\%$. Powyższe rozważania doprowadziły nie tylko do poznania współczynnika filtracji w skali całego systemu Zdroju Głównego, ale dały wyobrażenie o jego objętości, wysokości i odległości obszaru zasilania. Oczywiście podobne rozważania można także przeprowadzić dla odwiertów, w przypadku sprzyjających okoliczności (tzn. istnienia możliwości oszacowania gradientu hydraulicznego i średniego wydatku eksploatacji).

W przypadku odwiertu K-6 można w przybliżeniu dopasować także model z $\beta = 0,00$. Postępując podobnie jak w przypadku odwiertu K-7, otrzymuje się wiek składowej starszej, wynoszący jedynie ok. 79 lat. Należy zauważyć, że średni wiek składowej z trytem w Zdroju Głównym jest niższy niż w K-6, ale współczynnik β ma znacznie wyższą wartość, co pokrywa się z dalszymi rozważaniami, sugerując średni wiek znacznie wyższy niż w K-6, zgodnie z różnym położeniem obszarów zasilania obu ujęć.

Obecność składowej z trytem wskazuje na potencjalną podatność Zdroju Głównego na zanieczyszczenia antropogeniczne, które mogłyby się pojawić na zachodnim zboczu Góry Parkowej. Natomiast w przypadku otworu K-6 mogą to być zanieczyszczenia dopływające z niewielkiej odległości ze strony północnej.

Odwierty K-3 (suma składników stałych — $3920 \text{ mg}/\text{dm}^3$, filtr na gł. 99–228 m), K-4a ($2400 \text{ mg}/\text{dm}^3$, 95–115 m), K-5 (Tadeusz, $3910 \text{ mg}/\text{dm}^3$, 168–132 m), K-8 ($2110 \text{ mg}/\text{dm}^3$, 202–296 m), K-25 ($4700 \text{ mg}/\text{dm}^3$, 367–475 m) i K-27 ($1500 \text{ mg}/\text{dm}^3$, 145–197 m). Wody w tych ujęciach są pozbawione trytu, a więc infiltrowały całkowicie przed 1954 r. W przypadku odwiertu K-25 uzyskana wysokość położenia obszaru zasilania nie przekracza w zasadzie wysokości szczytowych partii Huzarów, a dla K-27 szczytowych partii wzgórza 795, ale biorąc dodatkowo pod uwa-



Ryc. 9. Stężenia trytu mierzone w wodzie z otw. K-9. Brak możliwości „dobrego” dopasowania wynika przypuszczalnie ze zmienionych warunków dopływu wywołanych rozpoczęciem eksploatacji w sąsiednim otworze (K-18)

Fig. 9. Tritium concentration measured in K-9 well. Poor fit probably results by change in flow pattern caused by exploitation in the adjacent well (K-18)

gę rozpatrywane dalej otwory K-10 i K-18, trudno zgodzić się z koncepcją zasilania tych wszystkich otworów na szczytach wyniesień. Tak więc, wody z otworów K-25 i K-27 są bardzo lekkie izotopowo, przypuszczalnie wskutek domieszki wody wieku glacialnego (Ciężkowski & Zuber, 1997). Niezależnie od słuszności hipotezy odnośnie obecności wody glacialnej, obszary zasilania wszystkich wymienionych wyżej ujęć znajdują się na południowo-zachodnich stokach wyniesień pomiędzy Jasiennikiem i Huzarami i na zachodnim stoku Huzarów. Ze względu na brak trytu, wszystkie te ujęcia są bardzo dobrze odporne na zanieczyszczenia antropogeniczne.

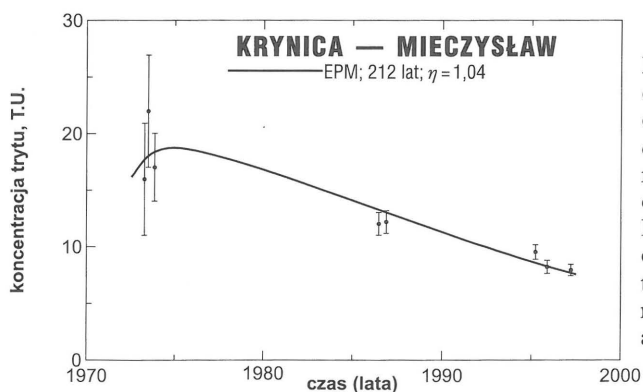
Skład izotopowy wody w otworze K-8 jest cięższy (tab. 2) od wszystkich pozostałych szczaw niechlorkowych Krynicy, w tym także od sąsiadującego otworu K-6, i odpowiada wysokości obszaru zasilania ok. 650 m n.p.m., podczas gdy rzędna odwiertu wynosi 646 m n.p.m. Być może tak ciężki skład izotopowy jest rezultatem małej domieszki jakiejś wody starszej, za czym przemawia podwyższona zawartość chlorków (ok. 25 mg/dm³) w porównaniu z innymi szczawami niechlorkowymi, które mają naturalne zawartości Cl⁻ ok. kilku mg/dm³.

Wody HCO₃-Ca-Mg, HCO₃-Mg-Ca i HCO₃-Ca≅Mg

Źródło Słotwinka (0,36 m³/h). Skład izotopowy wody sugeruje położenie głównego obszaru zasilania w znacznej odległości, na południowo-zachodnich stokach Hawrylakówki, lub zachodnim stoku wzgórza 795. Podana tutaj interpretacja położenia obszaru zasilania zasadniczo różni się od sugerowanego przez Ciężkowskiego i in. (1996) zasilania na stokach Jaworzynki. Tak więc, problem położenia obszaru zasilania tego źródła pozostaje w sferze wątpliwości.

Tryt wskazuje na istnienie lokalnej składowej zasilania, wynoszącej ok. 20% (ryc. 8). Znaczny rozrzut punktów wynika przypuszczalnie ze zmiennej wartości β , tzn. zmieniającego się udziału obu składowych. Niski średni wiek składowej lokalnej (14 lat) świadczy o podatności na zanieczyszczenia antropogeniczne, zredukowanej w pewnym stopniu przez mały udział wody młodej (z trytem) w całkowitym dopływie.

Za znacznym wiekiem składowej bez trytu przemawia wysoka mineralizacja (ok. 4,5 g/l) wody Słotwinki, porównywalna jedynie z mineralizacją wód w niektórych odwiertach, pozbawionych trytu (np. K-3, K-5 i K-18), lub mających istotne domieszki wód bez trytu (np. K-9 i K-14). Przeprowadzając dla Słotwinki interpretację, podobnie jak w przypadku Zdroju Głównego, otrzymuje się parametry zestawione w tab. 3.



Odwierty K-9 i K-14 (Mieczysław). Oba ujęcia charakteryzują się znacznymi stężeniami trytu (ryc. 9 i 10). Jednak znaczne mineralizacje i składy izotopowe sugerują możliwość obecności domieszki wody zasilanej w okresie glacialnym. Z tego powodu, mimo obecności trytu, położenia obszarów zasilania uzyskane ze wzorów 6 i 7 są nieprawdopodobnie wysokie (tab. 2). W przypadku K-9 dopasowanie modelu trytowego jest dalekie od dobrego (ryc. 9), przypuszczalnie wskutek zmiennych warunków dopływu wody wynikających z rozpoczęcia eksploatacji w otworze K-18.

Mimo dobrego dopasowania, wątpliwości budzą także parametry modelu uzyskanego dla odwiertu K-14 w porównaniu ze składem izotopowym wody. Mianowicie, skład izotopowy wskazuje albo na zasilanie na znacznej wysokości albo na obecność składowej glacialnej, jak to wspomniano wyżej. Typ modelu (EPM) natomiast i uzyskane parametry (ryc. 10) nie są zgodne z hipotezą obecności wody infiltrującej na dużej wysokości. Z drugiej strony, zakładając obecność składowej glacialnej, czyli $\beta > 0$, można uzyskać wiele modeli z równie dobrymi dopasowaniami (kilka przykładów podano w tab. 1), ale wtedy brak jest jednoznaczności, co jest oczywistym efektem nakładania się parametrów, gdyż modele mające trzy parametry są niejednoznaczne jeżeli można dopasować model z dwoma parametrami. Reasumując, należy stwierdzić, że zarówno dla otworu K-14 jak i K-9, obecny stan badań nie pozwala na jednoznaczne określenie modeli, a więc i czasów dopływu wody. Mimo wątpliwości odnośnie wiarygodności dopasowanych modeli, obecność trytu wskazuje na podatność obu ujęć na zanieczyszczenia antropogeniczne.

W przypadku ujęcia K-14, można przypuszczać, że jest ono zasilane przez wody Krynicy, dostające się do ujęcia poprzez strefę uskoku Krynicy. Średni wiek wód Krynicy nie był jednak badany, a więc powyższa hipoteza nie może być bliżej uzasadniona. Modele przytoczone w tab. 1 dla wartości $\beta > 0$ pokazują, że alternatywną interpretacją jest przyjęcie istnienia składowej dopływu bez trytu, domyślnie wieku glacialnego, co by tłumaczyło lekki skład izotopowy wody. Wtedy składowa dopływu zawierająca tryt może być pochodzenia lokalnego (tzn. obszar zasilania znajduje się blisko ujęcia). W obu przypadkach, obecność trytu wskazuje na pewną podatność ujęcia Mieczysław na zanieczyszczenia antropogeniczne, zwłaszcza biorąc pod uwagę albo zasilanie pośrednie poprzez potok, albo zasilanie lokalne na obszarze zabudowanym.

Odwierty K-10 (suma składników stałych — 9820 mg/dm³, filtr na gł. 375–423 m) i K-18 (4930 mg/dm³, 203–244 m). Ujęcia te mają wody pozbawione trytu, a ich skład izotopowy daje nieprawdopodobnie wysokie położe-

Ryc. 10. Stężenia trytu mierzone w wodzie z otw. K-14 (Mieczysław). Dopasowany model nie odpowiada głębokości eksploatacji i składowi izotopowemu (p. tekst). Przy wprowadzeniu dodatkowego parametru $\beta > 0$ otrzymuje się wiele innych modeli równie dobrze dopasowanych (dwa przykłady pokazane są w tab. 1), co oznacza brak możliwości uzyskania jednoznacznego rozwiązania **Fig. 10.** Tritium concentration measured in K-14 well. The model obtained is inconsistent with the depth of exploitation and the isotope composition (see text). When $\beta > 0$ is introduced an infinite number of models can equally well be fitted, which means the lack of a unique solution

nia obszarów zasilania (tab. 2). Woda w K-10 była niewątpliwie zasilana w okresie glacjału (ponad 10 tys. lat temu), a woda w K-18 zawiera przypuszczalnie znaczną domieszkę wody glacialnej, podobnie jak rozpatrywane wyżej wody z odwiertów K-9, K-14, K-25 i K-27, co jest zgodne z wcześniejszą hipotezą Ciężkowskiego i Zuber (1997). Obydwa ujęcia są doskonale odporne na zanieczyszczenia antropogeniczne.

Ujęcia Zuber I-IV. Obecność w otworze K-10 wody glacialnej stwierdzonej poza wątpliwościami, sugeruje, że poniżej wód glacialnych mogą występować wody starsze. Takie przypuszczenie jest zgodne z hipotezą o interglacialnym wieku składowej infiltracyjnej w zuberach, szczególnie przedstawioną w pracy Zuber (1987), a uzyskaną z ekstrapolacji hipotetycznej linii mieszania się wód infiltracyjnych i nieinfiltracyjnych do przecięcia się z linią opadową. Ten punkt przecięcia odpowiada mniej więcej składowi izotopowemu wód współczesnych, tzn. wodzie zasilanej w podobnym klimacie do klimatu współczesnego. Przyjmując więc wiek ok. 200 tys. lat, mikroporowatość 0,01 do 0,05, odległość przepływu ok. 500 m i gradient w granicach 0,01 do 0,10, otrzymuje się współczynnik filtracji w granicach 10^{-11} do 5×10^{-10} m/s.

Wnioski

Zastosowanie bardzo prostych modeli do ilościowej interpretacji danych trytowych pozwala na uzyskanie średnich wartości parametrów w skali danego systemu wodonośnego. Dla większości ujęć wód leczniczych Krynicy kompleksowo interpretowane dane trytowe i izotopowe pozwalają w szczególności określić przypuszczalne położenie obszarów zasilania, czasy dopływu wód i współczynniki filtracji w skali całych drenowanych systemów, co nie jest możliwe do osiągnięcia innymi metodami.

Dla niektórych ujęć Krynicy stan ich dotychczasowego rozpoznania nie pozwala na jednoznaczną ilościową interpretację wieków i położenia obszarów zasilania. Jednak nawet w tych przypadkach można jakościowo oszacować odporność ujęć na zanieczyszczenia antropogeniczne.

Interpretacja ilościowa sugeruje, że we wszystkich ujęciach (wyjątek stanowią źródła Słoneczne 1 i 2) w których występuje tryt, ujawnia się dopływ wody bez trytu, co w niektórych przypadkach znajduje potwierdzenie innymi metodami (np. wysoka mineralizacja świadcząca o bardzo długim czasie oddziaływania między wodami bogatymi w CO_2 a skałami, lub skład izotopowy pokazujący obecność domieszki wody glacialnej). Wyjątkowo niska mineralizacja Jana, mimo obecności składowej bez trytu, może być tłumaczona dopływem CO_2 przypuszczalnie jedynie w pobliżu ujęcia. Woda glacialna w otworze K-10 ma zdecydowanie wyższą mineralizację niż pozostałe wody (za wyjątkiem zuberów). Jak już wspomniano, jest to niewątpliwie związane z długim czasem oddziaływania woda-skała. Wody o składzie izotopowym sugerującym

obecność składowej glacialnej (np. K-9, K-14 i K-18) mają mineralizację wyraźnie powyżej 4000 mg/dm^3 . Wysokie mineralizacje mają jednak również wody w niektórych innych ujęciach, gdzie raczej składowa glacialna nie występuje (K-3, Tadeusz i Słotwinka), chociaż ich średnie wieki są niewątpliwie powyżej zakresu metody trytovej.

Położenie wszystkich ujęć, geologia obszaru Krynicy (Oszczytko i in., 1998) oraz otrzymane wyniki badań izotopowych, pokazują wyraźnie na zasilanie wszystkich ujęć wód mineralnych na obszarze lewego (wschodniego) brzegu Krynicy, co oznacza, że z punktu widzenia ochrony wód, rozwój uzdrowiska powinien odbywać się raczej po stronie zachodniej Krynicy.

Literatura

- CIEŻKOWSKI W. & KRYZA J. 1989 — Deuter i tlen-18 w zwykłych wodach podziemnych Sudetów. Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski. Pr. Nauk. Inst. Geotechn. Politechn. Wrocław, 58: 183-188.
- CIEŻKOWSKI W. & ZUBER A. 1995 — Stabilne izotopy tlenu i wodoru w zwykłych wodach podziemnych centralnej części Karpat polskich, Współczesne problemy hydrogeologii. Wyd. Profil, Kraków. t. 7: 245-250.
- CIEŻKOWSKI 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.
- CIEŻKOWSKI W. & ZUBER A. 1997 — Wstępne dane o wodach glacialnych w niektórych ujęciach wód leczniczych Beskidu Sądeckiego. Współczesne problemy hydrogeologii (red. J. Górski & E. Liszkowska). Wyd. WIND, Wrocław: 327-329.
- CIEŻKOWSKI W. DOKTÓR S., GRANICZNY M., KABAT T., LIBER-MADZIARZ E., PRZYLIBSKI T., TEISSEYRE B., WIŚNIEWSKA M. & ZUBER A. 1996 — Próba określenia obszarów zasilania wód leczniczych pochodzenia infiltracyjnego w Polsce. Zał. 16, Złoże wód leczniczych Krynicy. Zakł. Bad.-Rozw. „Zdroje” Wrocław (dokumentacja).
- DOWGIAŁO J. 1973 — Wyniki badań składu izotopowego tlenu i wodoru w wodach podziemnych Polski południowej, Biul. Inst. Geol., 277: 319-337.
- DULIŃSKI W., FLORKOWSKI T., GRABCZAK J., REŠKO D., WĘCŁAWIK S. & ZUBER A. 1987 — Ochrona wód mineralnych Krynicy w świetle wstępnych badań izotopowych. 25-lat górnictwa uzdrowiskowego. Wyd. AGH, 119-134.
- GAT J.R. & GONFIANTINI R. (red.) 1981 — Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in Water Cycle. IAEA, Tech. Report Ser., 210, Vienna.
- GRABCZAK J. & ZUBER A. 1983 — Isotope composition of waters recharged during the Quaternary in Poland. Freiburger Forschungshefte, C.388: 93-108.
- OSZCZYPKO N., MALATA E., OSZCZYPKO-CLOWES M. & DUŃCZYK L. 1998 — Budowa geologiczna Krynicy (płaszczowina magurska). Pr. Geol., 47: 549-559.
- ŚWIDZIŃSKI H. 1972 — Geologia i wody mineralne Krynicy. Wyd. Geol.
- ZUBER A. 1987 — O pochodzeniu wód typu zuber. 25-lat górnictwa uzdrowiskowego. Wyd. AGH, Kraków: 37-51.
- ZUBER A. 1999 — Interpretacja wieków trytowych wód podziemnych prostymi modelami matematycznymi. Pr. Geol., 47: 571-573.
- ZUBER A. & CIEŻKOWSKI W. 1997 — Regional parameters of some fissured aquifers in the Bohemian Massif obtained from environmental tracer data. Acta Universitatis Wratisl., 2052, Hydrogeology: 181-197.