

Danuta MAŁECKA¹, Zbigniew NOWICKI²

SKŁAD IZOTOPOWY WÓD PODZIEMNYCH TATR I PODHAŁA

(z 5 fig.)

ISOTOPE COMPOSITION OF GROUNDWATER IN TATRA MOUNTAINS AND PODHALE BASIN

(with 5 Figs.)

Abstract: Results of isotopic investigations of groundwaters in Tatra Mountains and Podhale Basin are presented. Measurements of stable (hydrogen, oxygen and carbon) and radioactive (hydrogen and carbon) isotopes are performed. The hydrogeological properties of the Tatra Mts. and Podhale Basin were shown as the result of the complex regional, hydrogeological investigations. Origin and „age” of groundwater is discussed.

Key words: isotope composition, „age” of groundwater, Podhale Basin, Tatra Mts.

Abstrakt: W artykule przedstawiono dotychczasowe wyniki badań izotopowych dotyczących wód podziemnych występujących na obszarze Tatr i Podhala. Oznaczeniami objęto izotopy trwałe (wodoru, tlenu i węgla) i promieniotwórcze (wodoru i węgla). Na podstawie wyników kompleksowych, hydrogeologicznych badań regionalnych przedstawiono warunki hydrogeologiczne Tatr i Niewiaduckiej Podhalańskiej oraz omówiono pochodzenie i „wiek” wód podziemnych.

Słowa kluczowe: skład izotopowy, „wiek” wód podziemnych, Podhale, Tatry.

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, al. Mickiewicza 93, 02-089 Warszawa
² Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

WSTĘP

Rozpoznanie środowiska przyrodniczego, w tym również wód podziemnych, opiera się nie tylko na określeniu ich aktualnego stanu, ale także na rozpoznaniu zmian zachodzących pod wpływem czynników naturalnych i antropogenicznych. Wymaga to prowadzenia badań w określonym zakresie i jest istotnie trudniejsze (Kazimierski i in., 1999).

Na terenie Tatr i Podhala, gdzie na stosunkowo niewielkim obszarze graniczy ze sobą wiele jednostek geologiczno-strukturalnych o różnicowanej litologii i stopniu zaangażowania tektonicznego, od ponad 30 lat zespół pracowników Uniwersytetu Warszawskiego prowadzi badania stacjonarne dynamiki i jakości wód podziemnych (Małecka, Lipniacka, 1990; Małecka, Małecki, 1996, 1998). W celu rozszerzenia zakresu tych badań o dane izotopowe, które stanowią ważny element w rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych terenu, w latach 1986–1988 w ramach programu „Ochrona i kształtowanie środowiska przyrodniczego” przeprowadzono kilkakrotne próbowanie wód do oznaczenia trytu oraz stabilnych izotopów tlenu i wodoru. Opróbowaniem objęto 22 punkty hydrogeologiczne (fig. 1). Łącznie dysponowano wynikami 55 analiz reprezentujących wody podziemne serii osadowych i eocenu w graniczonego w obrębie orograficznej części Tatr, wody gruntowe (swobodne) poziomu przypowierzchniowego Podhala oraz wody artezyjskie południowego skrzydła niecki podhalańskiej (tab. 1).

Poza dotychczas niepublikowanymi wynikami tych badań, w opracowaniu wykorzystano oznaczenia izotopowe pochodzące z materiałów archiwalnych OBRTG w Warszawie. Dopelnienie informacji stanowiły analizy izotopowe (trytu, deuteru, ^{18}O , ^{14}C) zawarte w dokumentacjach hydrogeologicznych (Chowaniec i in., 1997b), a także wyniki badań prowadzonych w latach 1983–1985 przez Róśka i Dulińskiego (1988) na terenie Tatr Zachodnich.

Celem artykułu jest omówienie dotychczasowych wyników oznaczeń izotopowych w próbkach wód podziemnych pochodzących z terenu Tatr i Podhala oraz wyciągnięcie wniosków i podanie sugestii co do potrzeby kontynuacji i ewentualnego rozszerzenia zakresu tych badań.

GEOLOGICZNE ŚRODOWISKO WÓD PODZIEMNYCH I JEGO WPŁYW NA KSZTAŁTOWANIE WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH

W skład analizowanego terenu wchodzi dwa obszary zasadniczo różniące się pod względem budowy geologicznej: Tatry — młody maszyn górski, charakteryzujący się dużym zróżnicowaniem krajobrazowym i hipsometrycznym oraz Podhale — rozległe obniżenie tektoniczne, w którego skład wchodzi szereg regionów geomorfologicznych: rów podtatrzanski, Pogórze Gubałowskie, pieniński pas skałkowy i Kotlina Orawsko-Nowotarska.

Tatry, jako gniazdo górskie wyniesione ponad otaczające je niecki paleogeograficzne, stanowi najbardziej ku południowi wysunięty fragment Karpat wewnętrznych. Należy do obszarów o skomplikowanej budowie geologicznej typu płaszczowinowego. Generalnie wyróżnia się tu dwie strefy:

— wierzchowa, składająca się z paleozoicznych skał magmowych i metamorficznych tworzących trzon krystaliczny, pokryty od północy osłonami skał osadowych oraz nasuniętych na nie fałdów leżących Czerwonych Wierchów i Giewontu — ocalałych przed erozją części krystalicznego (Sokołowski, 1959);

— reglowa, pozbawiona skał krystalicznych, która została odkłuta od macierzystego podłoża i nasunięta w postaci płaszczowin na fałdzące się serie wierzchowe; osady tego wieku mezozoicznego

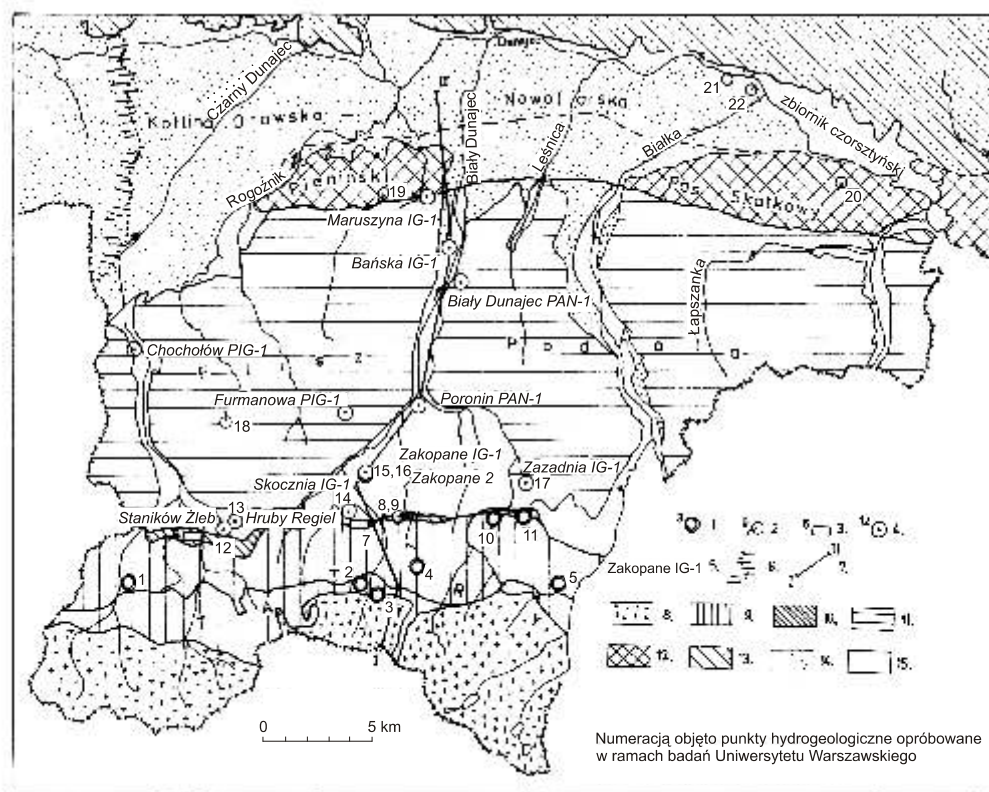


Fig. 1. Lokalizacja punktów opróbowania izotopowego na tle geologii Tatr i Podhala

1 — wywierzyisko, 2 — ródło, 3 — ujęcie komunalne, 4 — głębokie wiercenia badawcze, 5 — nazwa i symbol otworu wiertniczego, 6 — dział wód podziemnych pomiędzy zlewiskiem morza Bałtyckiego i Czarnego, 7 — linia przekroju geologicznego, 8 — trzon krystaliczny Tatr, 9 — serie osadowe, 10 — eocen wapienno-gliniany, 11 — flisz podhalański, 12 — utworzy Pienińskiego pasa skałkowego, 13 — flisz Karpat zewnętrznych, 14 — osady fluwioglacjalne i glacialne, 15 — aluwia głównych dolin rzecznych

Sampling sites for isotopic determinations and geology of the Tatra Mts. and Podhale Basin

1 — vaucuse spring, 2 — spring, 3 — groundwater intake, 4 — deep wells, 5 — symbol of the borehole, 6 — groundwater divide between drainage areas of Baltic Sea and Black Sea, 7 — geological cross-section, 8 — Tatra Mts. crystalline series, 9 — sediment series, 10 — Eocene limestones, 11 — Podhale flysch formations, 12 — Pieniny Klippen Belt formations, 13 — Outer Carpathians flysch formations, 14 — fluvioglacial and glacial deposits, 15 — alluvial deposits

Tabela 1

Otwory badawczo-eksploatacyjne niecki artezyjskiej Podhala opróbowane izotopowo
 Hydrogeological test boreholes of Artesian Podhale Basin sampled for isotopic composition

Nazwa i symbol otworu	Rok wykonania	Odległość od Tatr [m]	Rz dna terenu [m n.p.m.]	Gł b. otw. [m]	Uj ty poziom wodono ny					Hydrochemiczny typ wody wg Szczukariewa-Priklo skiego	
					Wykształcenie litologiczne i wiek wodono ca	GH boko strefy opróbow. [m]	Wydajno Q [m ³ /h]	Temp. wody na wypływie [°C]	rednia mineralizacja [mg/dm ³]		H ₂ S [mg/dm ³]
A. Południowe skrzydło niecki artezyjskiej Podhala											
Staniaków Iełb	1982	125	967,0	110,1	eoceen w glanowy – wapienie, wapienie dolomityczne i dolomity	95–110,1	6,5	9,0	200	nw	HCO ₃ –Ca–Mg
Hruby Regiel IG-2	1973	525	935,0	707,1	eoceen w glanowy – wapienie numulitowe i dolomity	400–630	44,8	10,0	300	nw	HCO ₃ –Ca–Mg
Skoczniia IG-1	1986	720	883,2	700,0	serie tatrza skie – trias, dolomity i wapienie dolomityczne, zbrekcjonowane	554,2–566,7; 598,7–624,7	22,7	16,8	330	0,17–0,51	HCO ₃ –Ca–Mg
Zakopane IG-1	1963	1680	864,9	3073,2	serie tatrza skie – jura dolna, margle i wapienie margliste z rogowcami	1540–1620	50*	35,5	356	1,3	HCO ₃ –SO ₄ –Ca–Mg
Zakopane–2	1975	1600	868,2	1113,0	eoceen w glanowy – wapienie organodetrytyczne, zlepnie ce i dolomity	1064,5–1111,0	80*	26,4	320	1,0	HCO ₃ –Ca–Mg
Zazadnia IG-1	1986	1550	855,2	680,0	eoceen w glanowy – wapienie w stro-powej cz ci z faun , w sp gu detrytyczne	653,5–674,5	25	22,0	187	nw	HCO ₃ –SO ₄ –Ca–Mg

Tabela 1 cd.

Nazwa i symbol otworu	Rok wykonania	Odległość od Tatr [m]	Rz. dna terenu [m n.p.m.]	Gł. b. otw. [m]	Wykształcenie litologiczne i wiek wodonośca		Ujęty poziom wodonośny				Hydrochemiczny typ wody wg Szczukariewa-Priklo skiego	
					Gł. boku strefy opróbow. [m]	Temp. wody na wytwie [°C]	rednia miner. [mg/dm ³]	H ₂ S [mg/dm ³]	Wydajność Q [m ³ /h]	Temp. wody na wytwie [°C]		
B. Centralna i północna cz. niecki												
Furmanowa PIG-1	1990	4700	1010,0	2324,0	eocen w glanowy – zlepie ce, wapienie i wapienie margliste serie tatra skie – jura, kreda, wapienie krzemionkowe i piaskowce kwarcytowe	2003–2324	60,0	716	12,53	77**	60,0	HCO ₃ –Na–Ca
Poronin PAN-1	1989	5400	741,0	3003,0	serie tatra skie – trias rodkowy, dolomity zbrekcyjne i wapienie	1768–1855	58,3	1136	28,13	80**	58,3	SO ₄ –HCO ₃ –Cl–Na–Ca
Chochołów PIG-1	1990	8500	778,0	3572,0	serie tatra skie – trias rodkowy, dolomity zbrekcyjne i wapienie	3218–3572	82,0	1407	7,64	150**	82,0	SO ₄ –Ca–Na
Białe Dunajec PAN-1	1989	10500	685,0	2394,0	eocen w glanowy- zlepie ce serie tatra skie – trias rodkowy, wapienie dolomityczne, dolomity i wapienie margliste	2117–2394	49,0	2620	4,9	270***	49,0	SO ₄ –Cl–Na–Ca
Balska IG-1	1981	12000	679,0	5261,0	eocen w glanowy – wapienie, wapienie margliste, zlepie ce serie tatra skie – trias górny, wapienie margliste, margle	2565–2683	79,7	2690	3,4	50**	79,7	SO ₄ –Cl–Na–Ca

* wydajno eksploatacyjna, ** wydajno w czasie pompowania zespołowego (Chowaniec i in., 1997b), *** wydajno po kwasowaniu otworu
Opracowano na podstawie materiałów archiwalnych i publikowanych
A – otwory opróbowane przez zespół pracowników Uniwersytetu Warszawskiego
B – otwory opróbowane przez pracowników Karpackiego Oddziału PIG

* wall discharge, ** discharge in time of group pumping test (Chowaniec *et al.*, 1997b), *** discharge after borehole acidising
Base on the archival and published papers

A – hydrogeological boreholes sampled by Warsaw University workers

B – hydrogeological boreholes sampled by Polish Geological Institute workers (Carpathian Branch)

(trias–jura–kreda), reprezentowane przez wapień, dolomity, margle i łupki margliste oraz piaskowce i zlepieńce, zostały sfałdowane w szereg płaszczowin i łusek tektonicznych o skomplikowanej budowie.

Bez względu na pozycję stratygraficzną utworów możliwe są kolektorskie skały zbiornikowych warunkowane istnieniem wzajemnie skomunikowanych próżni tworzących mniej lub bardziej gęste sploty przewodów hydraulicznych (Kleczkowski, Rókoski red., 1997).

Z hydrogeologicznego punktu widzenia najważniejszą rolę odgrywają tu dolomity i wapień rodowego triasu, mimo że krasowieniu podlegają również wapień malmo-neokomu, a także zlepieńce, wapień i dolomity eocenu w graniczonego stanowiska spągowe ogniwo paleogenu Podhala (Głazek, Wójcik, 1963; Małecka, Roniewicz, 1997). Rozwojowi procesów krasowych sprzyja przede wszystkim wyniesienie masywu ponad otaczające go niecki paleogeńskie przy obfitych, najwyższych w kraju opadach atmosferycznych. W obrębie masywu tatrzańskiego występują zarówno wody porowe, szczelinowe, jak i szczelinowo-krasowe. Specyficzny charakter środowiska geologicznego każdego z wymienionych typów wód powoduje pewną niezależność w ich krążeniu i różnicę w szybkości przepływu. Lepsza w porównaniu z otoczeniem rodzajem porowym i szczelinowym drożność kanałów i próżni krasowych w określonych sytuacjach geologicznych powoduje przechwytywanie części spływających ku północy wód i odprowadzanie ich poza obszar zlewni hydrograficznych (Małecka, 1981; Małecka, Małecki, 1996). Zasilanie krążenie i drenaż tych wód wiążą się głównie z orograficznymi cięciwami masywu. W przypadku wód o południkowej orientacji przepływu, zgodnej z sekwencją zapadania serii tatrzańskich pod osadę fliszu podhalańskiego, obszarem zasilania są Tatry, ale drogi krążenia wykraczają poza obręb masywu, zasilając wody niecki artezyjskiej Podhala.

Prowadzone w Tatrach hydrogeologiczne badania stacjonarne (Małecka 1985; Małecka, Lipniacka, 1990; Małecka, 1996) wykazały, że wody podziemne za pośrednictwem skomplikowanych dróg krążenia pozostają między sobą w regionalnej więzi hydraulicznej. Nie potwierdziły one wcześniej wypowiedzianej hipotezy, że kras w Tatrach składa się z wielu niezależnych, izolowanych od siebie systemów. (Rudnicki, 1967; Rókoski, Duliński, 1988). Badania te pozwoliły również na stwierdzenie wyraźnej strefowości hydrochemicznej polegającej na konsekwentnym wzroście mineralizacji wód od partii szczytowych do podnóża orograficznej części masywu. Wody szczelinowe krystaliniku oraz piaskowców kwarcytowych triasu w dużej mierze dziedziczą skład chemiczny opadów atmosferycznych (Małecka, 1991; Małecka, Małecki, 2000). Natomiast chemizm wód podziemnych serii tatrzańskich i eocenu w graniczonego zależy głównie od czasu kontaktu wody ze środowiskiem skalnym.

Na terenie Podhala największy obszarowo jednostek geologiczno-strukturalną stanowi **flisz Podhala**. Utwory paleogenu (eocen–oligocen) wypełniają obniżenie synklinalne pomiędzy Tatrami a piennym pasem skałkowym. Kontakt z Tatrami jest głównie sedymentacyjny, natomiast ze skałkami — tektoniczny.

Wyniki wierce studziennych oraz badań wodochłonności osadów fliszu wykazały, że strefa aktywnej wymiany wód osiąga głębokość od kilkudziesięciu do 100 m (Jawański, 1973; Niedzielski, 1974; Małecka, Murzynowski, 1978 i literatura tam zawarta). Poniżej fliszu podhalańskiego (do głębokości 3000 m) stanowi pokryw izolacyjną dla wód termalnych niecki artezyjskiej Podhala (Chowaniec i in., 1997a). Utwory eocenu w graniczonego (spągowe ogniwo paleogenu) występują głównie w kontakcie sedymentacyjnym z seriami tatrzańskimi. Częściowo osadzały się one w strefie o charakterze klifu, częściowo zaś w płytkiej strefie przybrzeżnej. Znalazło to wyrażenie odbicie w wykształceniu litologicznym utworów (Roniewicz, 1969). Pod względem hydrogeologicznym eocen w graniczonego wykazuje wiele analogii z seriami regłów Tatr (Małecka, Roniewicz, 1997).

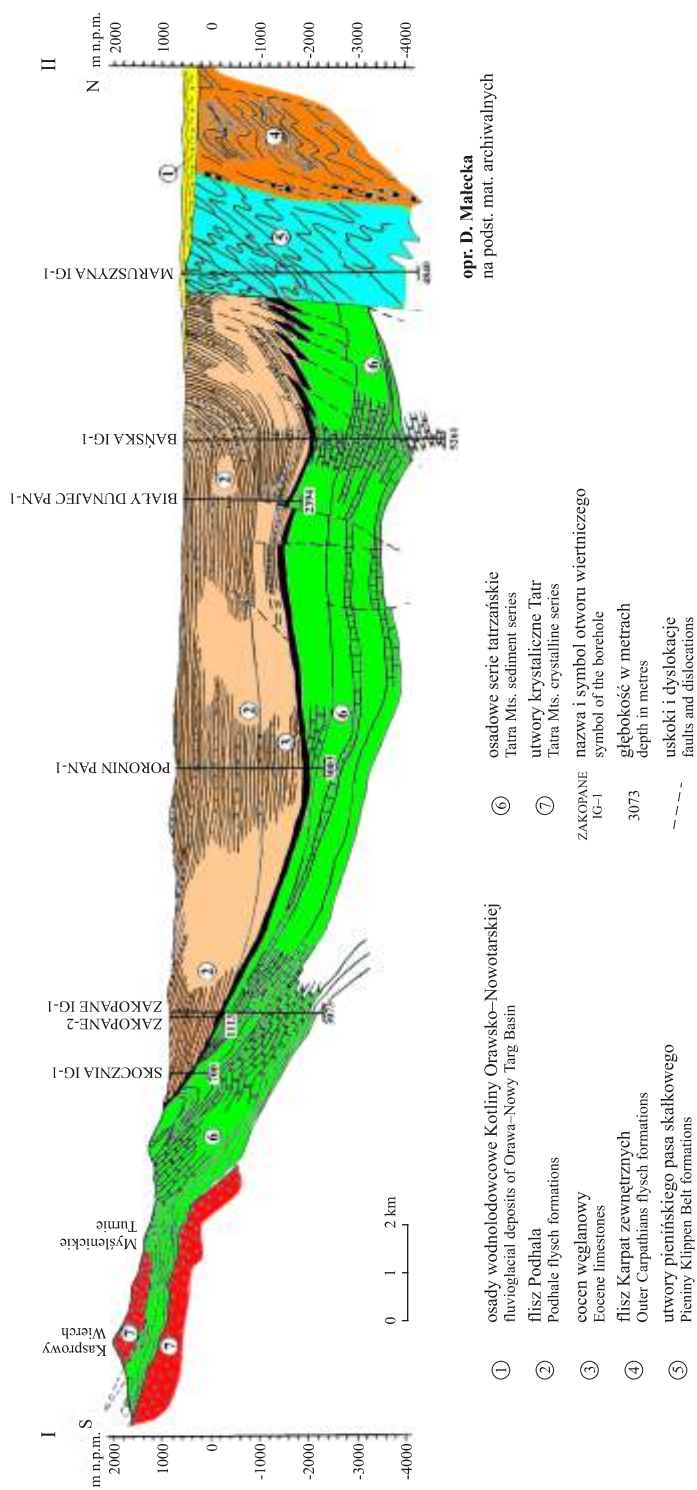


Fig. 2. Przekrój geologiczny Kasprový Wierch–Maruszyna
Geological cross-section Kasprový Wierch–Maruszyna

Pieni ski pas skałkowy, jako element składowy łuku karpackiego, stanowi granicę między jednostkami strukturalnymi Karpat wewnątrz i zewnętrznych. Pomimo dużej różnorodności stopień tektonicznego zaangażowania utworów sprawił, że wykazują one między sobą daleko idące analogie właściwości hydrogeologicznych. W czasie fałdowania osadów powstały formy typu diapirów, łusek i fałdów, a także dodatkowo gęsta sieć uskoków. Parametry hydrogeologiczne charakteryzujące to środowisko wodne są mało korzystne. Podobnie jak we fliszu podhalańskim, porowatość, jako czynnik warunkujący przepuszczalność utworów, nie ma praktycznego znaczenia, stopień ich zawodnienia zależy od ilości i charakteru szczelin umożliwiających aktywne wymiany wód. Poniżej tej kilkudziesięciometrowej strefy utwory skałkowe stanowią naturalną barierę uniemożliwiającą migrację wód termalnych w kierunku północnym, co potwierdziło negatywnie z hydrogeologicznego punktu widzenia wiercenie Maruszyna IG-1 (fig. 2). Według Birkenmajera (1986) wiercenie to przebiło kilka sfałdowanych i zbrekcjonowanych jednostek skałkowych i ich górnokredowej osłony.

Kotlina Orawsko-Nowotarska stanowi typowe zapadlisko ródgórskie wypełnione osadami klastycznymi neogenu i czwartorzędowymi. Poza ruchami dolnopliocenicznymi, które uformowały zasadnicze rysy tektoniczne kotliny, duży rolę należą przypisać procesom neotektoniki. Powierzchnia cokołu skalnego jest silnie urzeźbiona, co wpływa na różnicę w miąższości osadów klastycznych od kilku do około 100 m. Brak ciętych poziomów izolujących powoduje, że wody porowe pozostają w ścisłej styczności hydraulicznej, a możliwości eksploatacyjne są uzależnione głównie od stopnia zwietrzenia i przemycia środowiska skalnego. W porównaniu z wodami szczelinowymi fliszu podhalańskiego i pienińskiego pasa skałkowego parametry hydrogeologiczne, podobnie jak w utworach aluwialnych dolin rzecznych, są znacznie korzystniejsze.

Przy zachowaniu szeregu indywidualnych cech wymienione jednostki litologiczno-strukturalne charakteryzują się występowaniem dwóch głównych systemów krążenia wód, reprezentowanych przez:

— wody gruntowe poziomu przypowierzchniowego, które bez względu na charakter środowiska skalnego, w ośrodku porowym, szczelinowym czy szczelinowo-krasowym, układają się współkształtnie z morfologią terenu;

— wody głębiokiego krążenia niecki artezyjskiej Podhala, izolowane od powierzchni terenu miejscowym kompleksem fliszu Karpat wewnątrznych.

W pierwszym przypadku granice występowania tych wód pokrywają się z przebiegiem górnej części zlewni Dunajca, w drugim — uwarunkowane są drobnymi seriami tatrzańskimi i eocenu w gólanowego zapadających stromo pod utwory fliszu Podhala (fig. 2). Słuszność takiego podziału potwierdza również hydrochemiczna charakterystyka wód (Małecka, 1992).

CHEMIZM WÓD

Skład całego zespołu czynników i procesów kształtujących chemizm wód podziemnych w duży sposób odgrywa rolę ich kontakt z środowiskiem skalnym. W przypadku **wód poziomu przypowierzchniowego**, bez względu na charakter wodonośca (porowy, szczelinowy, szczelinowo-krasowy), szybki obieg wody sprawia, że charakteryzują się one zbliżonym odczynem, mineralizacją oraz makro- i mikroskładem. Duże pokrewieństwo hydrochemiczne tego poziomu potwierdzają również wyniki próbowania wód drenowanych przez ródła, w znikomym stopniu narażone na wpływy antropogeniczne. Chemizm tych wód zależy głównie od intensywności me-

teoretycznego zasilania. Są to wody ultrasłódkie i słodkie, głównie dwu- i trzycjonowe typu $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ i $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, których skład jest lokalnie modyfikowany pod wpływem gospodarczej działalności człowieka. Najlepszym tego przykładem są wody gruntowe obszarów zurbanizowanych, gdzie w dolinach rzecznych na terenie stożka zakopiańskiego oraz Kotliny Orawsko-Nowotarskiej lokalnie jest notowany wzrost koncentracji chlorków, siarczanów, azotanów oraz ogólnej mineralizacji wód. Rozszerzenie badań hydrogeochemicznych o dane izotopowe, stanowi cenne narzędzie w rozpoznaniu regionalnych warunków hydrogeologicznych, pozwoliło mi także innymi na potwierdzenie tezy o istnieniu wód hydraulicznej wód poziomu przypowierzchniowego w obrębie górnej części zlewni Dunajca obejmującej Tatry i Podhale.

W przypadku **niecki artezyjskiej Podhala** o hydrochemicznych typach wód decyduje nie tyle wykształcenie litologiczne i wiek wodonośca, co odległość od obszaru zasilania oraz warunki krążenia i wymiany wód. Badania eksperymentalne prowadzone w Tatrach i na terenie południowego skrzydła niecki artezyjskiej Podhala potwierdziły jednoznacznie, że obszarem zasilania podfliszowych poziomów wodonośnych jest masyw tatrzański, a więc meteoryczne pochodzenie tych wód nie budzi już wątpliwości (Małecka, Małecki, 1996, 1998). Tatry charakteryzują się najwyżej szczytami opadami w skali całego kraju, znakomita większość wód infiltracyjnych jest drenowana przez ródła i ciekły powierzchniowe, cząstka za systemem szczelin i próżni krasowych migruje ku północy, zasilając wody głębi bokiego krążenia ujmowane otworami badawczo-eksploatacyjnymi (fig. 1, tab. 1). Szybko przepływu tych wód w miarę oddalania się od obszaru zasilania ku północy ulega wyraźnie zmniejszeniu, a wody natrafiając na szczelną barierę utworów pienskiego pasa skałkowego rozprężają się wachlarzowato ku wschodowi i zachodowi a poza granicę państwa.

Szeroko zakrojone badania terenowe i laboratoryjne (Chowaniec i in., 1997b) pozwoliły na stwierdzenie, że szybko przepływu tych wód jest rzędu kilkudziesięciu metrów na rok w części południowej niecki do kilku metrów na rok w części północnej — przypięńskiej. Według klasyfikacji Kleczkowskiego (1990) odpowiada to ruchowi średnio szybkiemu do bardzo wolnego. Fakt ten nie może pozostać bez wpływu zarówno na skład chemiczny, jak i na wiek wód. Generalnie granica wyraźnej zmiany hydrochemicznych typów wód przebiega wzdłuż północnego obrzeżenia zbiornika wód podziemnych wymagających szczególnej ochrony (zbiornik Zakopane nr 441), około 4–4,5 km na północ od Tatr, na linii Furmanowa–Poronin (Małecka, 1992).

Zdaniem Witczaka (Chowaniec i in., 1997b) w nieodległej przeszłości geologicznej cała niecka artezyjska Podhala była wypełniona wodami słonymi. Wielokrotne przepłukanie jej w obecny etapie infiltracyjnym doprowadziło do wysłodzenia wód krążących w południowym skrzydle niecki artezyjskiej Podhala. Generalnie wody te pod względem hydrogeochemicznym nie odbiegają od wód drenowanych przez wywierzyska tatrzańskie i ródła eocenu w górnym.

Przy dominacji wód typu $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, w miarę oddalania się od strefy intensywnej zasilania, przy rosnącej temperaturze i ciśnieniu stopniowo wzrasta ogólna mineralizacja od poniżej 200 do około 400 mg/dm^3 w otworze Zakopane IG-1, a wzrost udziału jonu siarczanowego wpływa na zmianę hydrochemicznego typu wód (tab. 1).

We wszystkich analizowanych otworach strefy przytatrzańskiej zdecydowanie dominują wodorogłany i wapń, za chemizm wód wykazuje dużą stabilność.

Oprócz tempa wymiany wód infiltracyjnych na kształtowanie się składu chemicznego podfliszowych poziomów wodonośnych wpływają również warunki utleniająco-redukcyjne, zmiany ciśnienia i temperatury, działanie mikroorganizmów kontrolujących procesy geochemiczne oraz interakcyjne oddziaływanie szeregu czynników środowiskowych. Wzrost mineralizacji oraz wyraźne zmiany hydrochemicznych typów wód w obrębie niecki artezyjskiej Podhala zaobserwowano w najwyższym położonym otworze Furmanowa PIG-1, usytuowanym w strefie wododziałowej

między zlewniami Czarnego i Białego Dunajca, oraz w otworze Poronin PAN-1, odwierconym w dolinie Poronin (fig. 1). W Furmanowej, przy średniej mineralizacji kwalifikującej wody do akrotopegów, udział jonu HCO_3^- stanowi jeszcze około 80% mval, natomiast w Poroninie koncentracja tego jonu ulega wyraźnemu zmniejszeniu, przy równoczesnym wzroście siarczanów i chlorków. Wzrasta również procentowy udział sodu z kilku miliwali w wodach południowego skrzydła niecki podhalańskiej do kilkadziesiąt miliwali. W konsekwencji wody z odwiertu w Poroninie należą do wód wielojonowych $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$. W pozostałych otworach, reprezentujących centralną i północną część niecki, przy zaledwie kilkunastoprocentowym udziale jonu HCO_3^- zdecydowanie dominuje jon SO_4^{2-} , oscylujący w granicach 50% mval. Zawartość chlorków, zależna od możliwości kręcenia i warunków wymiany wód, kształtuje się w granicach od kilku procent miliwali w otworze Chochołów PIG-1 do ponad 37% mval w wierceniach w Białym Dunajcu i Bańskiej. Generalnie kręcenie w systemie wody wykazują narastającą zawartość chlorków w kierunku słabiej przemitych stref zbiornika.

Skomplikowane przestrzenne zmiany składu chemicznego wód niecki artezyjskie Podhala znajdują również potwierdzenie w wynikach badań izotopowych.

SKŁAD IZOTOPOWY TLENU I WODORU

Charakterystykę składu izotopów stabilnych tlenu i wodoru oparto głównie na wynikach próbowania wód podziemnych prowadzonych na terenie Tatr i Podhala w latach 1986–1988. Wszystkie oznaczenia analityczne zostały wykonane w Laboratorium Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Wyniki tych oznaczeń rozpatrywano w odniesieniu do dwóch głównych systemów kręcenia wód. W tabeli 2 zestawiono wartości minimalne, maksymalne i średnie charakteryzujące wody serii osadowych i eocenu w granicznym orograficznym części Tatr oraz wody podfliszowych pozi-

Tabela 2

Skład izotopowy wód podziemnych Tatr i niecki artezyjskiej Podhala

Isotopic composition of groundwaters in Tatra Mts. and Artesian Podhale Basin

Opróbowanie		^{18}O [‰]			D [‰]		
		min.	max.	r.	min.	max.	r.
Masyw tatrzański	różła i wywierzyska serii osadowych Tatr* n = 12	-12,2	-11,1	-11,7	-82,7	-75,6	-80,4
	różła eocenu w granicznym* n = 17	-11,4	-10,6	-11,1	-79,2	-72,7	-75,4
Niecka artezyjska Podhala (poziom podfliszowy)	południowe skrzydło niecki* n = 16	-11,7	-10,6	-11,1	-78,4	-72,0	-74,2
	część centralna i północna niecki** n = 8	-11,5	-10,6	-11,2	-81,0	-73,0	-77,7

* według danych Uniwersytetu Warszawskiego, ** według dokumentacji hydrogeologicznej (Chowaniec i in., 1997b)
base on Warsaw University date, base on hydrogeological documentation (Chowaniec *et al.*, 1997b)

Tabela 3

Skład izotopowy wód podziemnych Podhala – poziom przypowierzchniowy (n = 10)

Isotopic composition of subsurface groundwaters in Podhale

Opróbowane jednostki litologiczno-strukturalne	^{18}O [‰]			dD [‰]		
	min.	max.	r.	min.	max.	r.
Flisz Podhala	-11,3	-11,1	-11,2	-79,2	-78,0	-78,6
Pieni ski pas skałkowy	-11,8	-10,4	-10,9	-78,5	-70,5	-75,3
Kotlina Nowotarska	-11,2	-11,1	-11,2	-79,5	-76,8	-78,2

mów wodono nych niecki arzezyjskiej Podhala w podziale wynikaj cym z ich hydrochemicznej charakterystyki. Wody poziomu przypowierzchniowego, płytkiego kr enia rozpatrywano w nawi zaniu do głównych jednostek geologiczno-strukturalnych Podhala (tab. 3).

Istotne znaczenie dla interpretacji tych oznacze ma znajomo składu izotopowego wód opadowych i infiltruj cych współcze nie w rejonie prowadzonych bada . Warto ci dotycz ce wód infiltruj cych uzyskuje si zwykle wyznaczaj c skład izotopowy wód pobranych z pierwszego poziomu wodono nego co do których istnieje pewno , e skład ten jest u redniony (brak efektu sezonowego). Na obszarze Tatr, ze wszystkich efektów maj cych bezpo redni wpływ na skład izotopowy wód infiltruj cych (efekt kontynentalny, temperaturowy, sezonowy, wysoko ciowy,

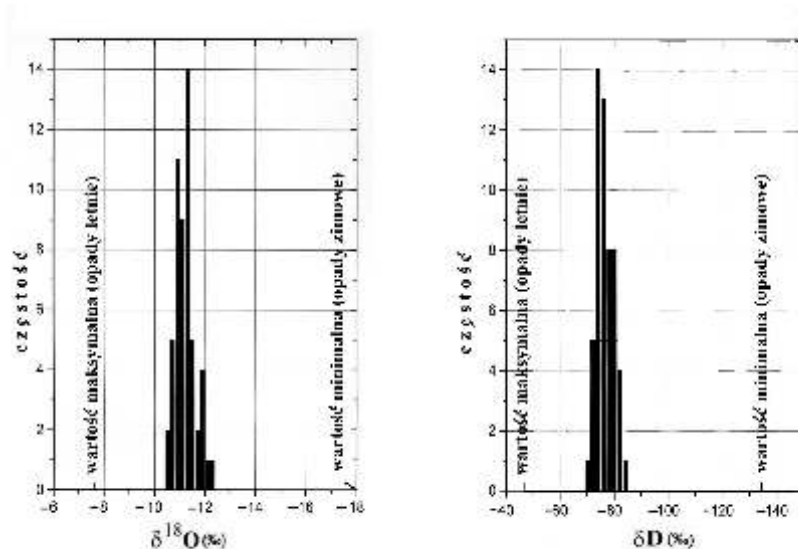


Fig. 3. Rozkład cz sto ci wyst powania ^{18}O i D w wodach podziemnych na tle zakresu ^{18}O i D w opadach atmosferycznych

Frequency distributions for ^{18}O and D in groundwaters against the background of range ^{18}O and D in precipitations

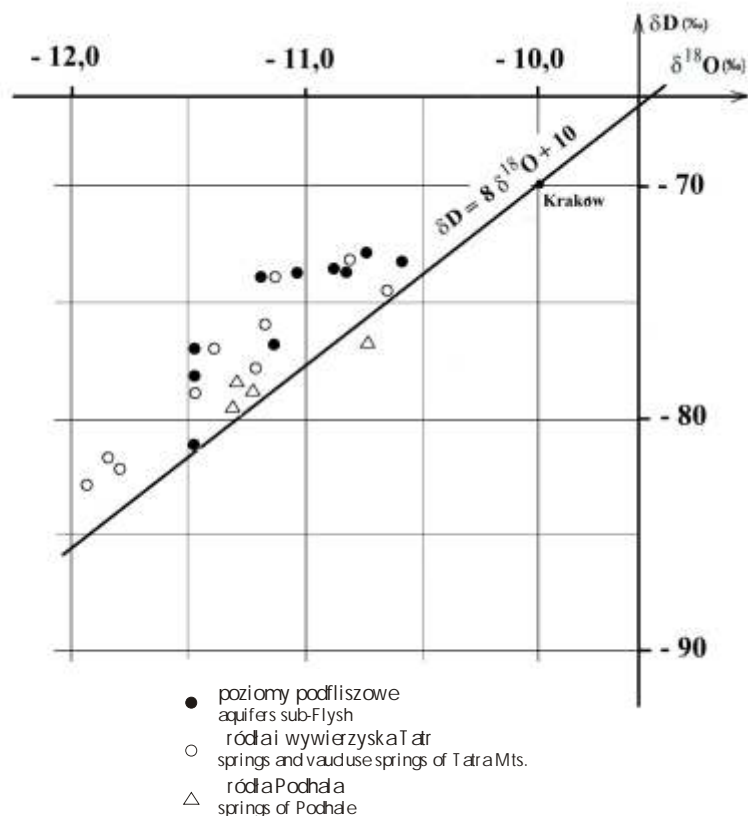


Fig. 4. Zależność $\delta^{18}\text{O}$ – δD w próbkach wód podziemnych

$\delta^{18}\text{O}$ – δD relationship for groundwater samples

ilościowy) decydujące znaczenie mają pochodne efektu temperaturowego, tzn. efekt wysokościowy i sezonowy. Efekt wysokościowy, według danych wiatowych, wynosi średnio dla deuteru (δD) 3,5‰ na 100 m wysokości.

Wyznaczenie składu izotopowego wód opadowych i ich zmienności sezonowej wymaga pomiarów $\delta^{18}\text{O}$ i δD we wszystkich opadach na obszarze badania, zbieranych np. w cyklach miesięcznych. Na obszarze Tatr, w rejonie stacji Ornak, badania takie przeprowadzili w latach 1984–85 Rósański i Duliński (1988). Wykazały one, że najwyższe wartości $\delta^{18}\text{O}$ i δD , charakterystyczne dla opadów letnich, wynoszą, odpowiednio, ok. $-7,6\%$ i ok. -46% , natomiast najniższe wartości $\delta^{18}\text{O}$ i δD , charakterystyczne dla opadów zimowych, wynoszą, odpowiednio, ok. -18% i ok. -135% . Wyniki te wprawdzie dotyczą jedynie rejonu stacji Ornak w okresie prowadzenia badania, jednakże wystarczająco dobrze obrazują skalną zmienność składu izotopowego wód opadowych w omawianym rejonie, wskazując jednocześnie na przewagę wpływu infiltracji „letniej” w zasileniu wód podziemnych (fig. 3).

rednie składy izotopowe wód podziemnych z obszarów Tatr i Podhala przedstawione w układzie współrzędnych ^{18}O – D na tle prostej Craiga ilustruje figura 4. Położenie wszystkich punktów w pobliżu wiatowej linii opadowej jednoznacznie świadczy o tym, że na badanym terenie, zarówno w obrębie poziomu przypowierzchniowego, jak również w poziomach podflisowych, występują jedynie wody infiltracyjne. Punkty te położone są poniżej punktu charakteryzującego średni skład izotopowy wód infiltrujących w rejonie Krakowa, co związane jest z wystąpieniem efektu wysokościowego.

Biorąc pod uwagę różnice wysokośći potencjalnych obszarów zasilania na terenie Tatr, można było się spodziewać, że maksymalne różnice w wartościach D powinny wynosić ok. 20–25‰. Jednak z dotychczasowych obserwacji wynika, że w wywierzysskach i źródłach tatrzańskich różnice te są znacznie mniejsze i nie przekraczają wartości 10‰. W stosunku do średniej wartości D w wodach infiltracyjnych, charakteryzujących rejon Krakowa, maksymalna różnica odchyłki deuterowej nie przekracza 15‰. Przymuszczalnie oznacza to, że izotopowy efekt wysokościowy w rejonie Tatr i Podhala jest mniejszy niż średnia wiatowa, wynosząca 3,5‰ na 100 m wysokości.

Kilkukrotne opróbowania tych samych punktów w różnych porach roku (grudzień, czerwiec, koniec sierpnia) pozwoliły na uchwycenie wielkości zmian składu izotopowego wód podziemnych w czasie. Zmiany te są nieznaczne i dla ^{18}O i D w poszczególnych punktach opróbowania na ogół nie przekraczają wartości, odpowiednio, 0,5 i 3,5‰, co wskazuje na niemal całkowity zanik efektu sezonowego. Brak tego efektu świadczy, zdaniem autorów, o bardzo dobrym mieszanii się wód podziemnych w obrębie utworów mezozoicznych masywu tatrzańskiego.

„WIEK” WÓD PODZIEMNYCH

„Datowanie” wód podziemnych jest związane z wyznaczeniem „wieku” wód pochodzących z jednego obszaru zasilania lub, w przypadku mieszaniny, „wieku” poszczególnych jej składowych. W Polsce do „datowania” są wykorzystywane najczęściej kosmogeniczne izotopy wodoru (tryt) i węgla (^{14}C).

Wystąpienie trytu w badanych wodach podziemnych oznacza, że infiltracja miała miejsce po pierwszym okresie prowadzenia prób z bronią drową, a więc nie dawniej niż ok. 50 lat temu. W celu wyznaczenia „wieku” wód, rozumianego jako czas przebywania wody w ośrodku skalnym, niezbędne jest wykonanie szeregu oznaczeń trytowych, pozwalających na określenie zmian w czasie. Jednakże pojedynczy pomiar stężenia trytu w wodach podziemnych dostarcza cennych informacji, które mogą być wykorzystane do rozpoznania warunków hydrogeologicznych (Felter, Nowicki, 1997).

„Datowanie” wód podziemnych metodą radiowęglą obejmuje okres od ok. 500 do ok. 30 000 lat przed czasami współczesnymi. Metoda opiera się na założeniu, że od momentu przerwania kontaktu dowolnego systemu wód podziemnych z atmosferycznym dwutlenkiem węgla, ilość zawartego w tych wodach izotopu ^{14}C zmniejsza się na drodze przepływu wyłącznie w wyniku rozpadu promieniotwórczego. Jeżeli jednak w systemie zachodzą dodatkowe procesy, np. wymiana izotopowa ze skałami lub dopływ węglanego dwutlenku węgla pozbawionego ^{14}C , wówczas konieczne jest stosowanie poprawki opartej na pomiarze ^{13}C .

Zagadnienia dotyczące „wieku”, datowania i czasu przepływu wód podziemnych zostały omówione w wielu opracowaniach, ostatnio m.in. w pracach Zuber (1986), Amina i Campana (1996), Małoszewskiego i Zuber (1997) oraz Dowgiałły i Nowickiego (1999).

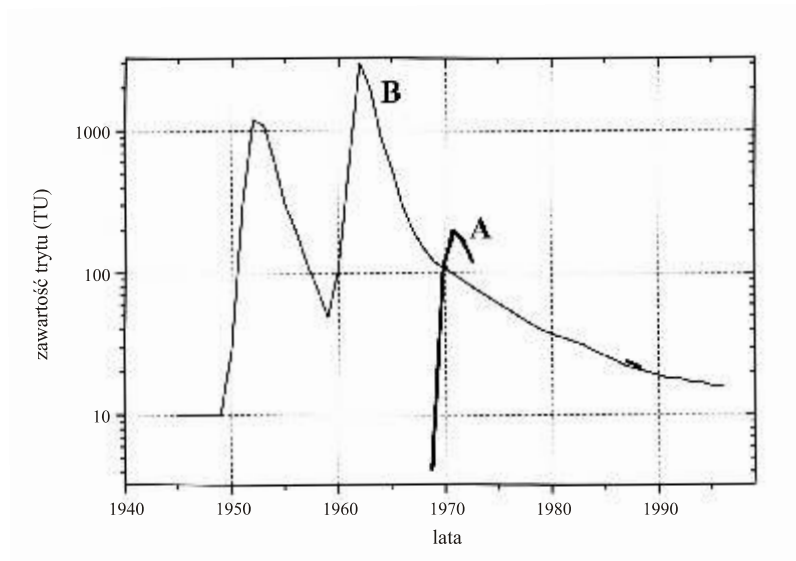


Fig. 5. Zmiany stężenia trytu w otworze Zakopane IG-1 (A) na tle zmian średnich stężenia trytu w opadach (B)
Changes of tritium concentrations in Zakopane IG-1 intake (A) against the background of changes of mean tritium concentrations in precipitations (B)

Badania izotopowe na obszarze Tatr i Podhala rozpoczęto jeszcze w 1969 r. w ówczesnym Dziale Radiometrii Przedsiębiorstwa Hydrogeologicznego w Warszawie (Nowicki, Sołtyk, 1973). Wykonano wówczas 5 oznaczeń stężenia trytu w próbkach wód podziemnych pobranych z otworu Zakopane IG-1. Próbkę pobierano raz w roku w sierpniu przez 5 lat. W okresie tym zarejestrowano przebieg krzywej trytowej w wodach podziemnych, będącej odzwierciedleniem wzrostu zawartości trytu w opadach atmosferycznych w wyniku prób z bronią drow z okresu 1952–1953. W pierwszej próbce, pobranej jeszcze w 1969 r., stężenie trytu było na poziomie kilku jednostek trytowych (TU) i przez dwa kolejne lata wzrastało do wartości niemal 200 TU, a następnie w latach 1972–1973 zanotowano obniżenie stężenia trytu do wartości ok. 120 TU (fig. 5). Nie ulega zatem najmniejszej wątpliwości, iż był to początek krzywej trytowej z okresu prób z bronią drow. W 1973 r. badania zakończono, a następujące próbki do oznaczeń trytowych zostały pobrane dopiero w latach 1986–1988. Stężenie trytu wynosiło wówczas od 20 do 24 TU.

Zebrane w latach 1969–1973 wyniki oznaczeń trytowych z otworu Zakopane IG-1 wskazują jednoznacznie, że czas dopływu wód podziemnych ze stref zasilania wynosił wówczas ok. 19 lat, przy czym czas ten wynika z różnicy pomiędzy okresem pojawienia się krzywej trytowej w otworze Zakopane IG-1 a początkiem krzywej trytowej w opadach atmosferycznych. Należy zwrócić uwagę, iż wielkość ta odnosi się do warunków eksploatacji i wielkości poboru wód z omawianego otworu w okresie prowadzenia badań trytowych (1969–1973), natomiast w warunkach naturalnych, bez eksploatacji, jest najprawdopodobniej znacznie większa. Wyniki tych badań, a zwłaszcza kształt krzywej trytowej dla otworu Zakopane IG-1 sugerują, że pojemność zbiornikowa poziomu podfliszowego pomiędzy obszarem zasilania a analizowanym otworem jest stosunkowo niewielka.

W latach dziewięćdziesiątych wykonano oznaczenia izotopowe m.in. stężeń ^{14}C , wartości ^{13}C i trytu w próbkach wód podziemnych pochodzących z 4 otworów badawczo-eksploatacyjnych podfliszowych poziomów wodonośnych (Nowicki 1992; Chowaniec i in. 1997b). Uzyskano wówczas następujące wyniki:

Furmanowa PIG-1 (1997)	$^{14}\text{C} = 37,4 \text{ pmc}$	$^{13}\text{C} = -4,4\text{‰}$
Poronin PAN-1 (1997)	$^{14}\text{C} = 23,2 \text{ pmc}$	$^{13}\text{C} = -5,5 \text{ ‰}$
Chochółów PIG-1 (1997)	$^{14}\text{C} = 3,2 \text{ pmc}$	$^{13}\text{C} = -3,0\text{‰}$
Bańska IG-1 (1997)	$^{14}\text{C} = 0,3 \text{ pmc}$	$^{13}\text{C} = -0,6\text{‰}$
Bańska IG-1 (1992)	$^{14}\text{C} = 0,5 \text{ pmc}$	$^{13}\text{C} = 0,3\text{‰}$
Bańska IG-1 (1992)	$^{14}\text{C} = 3,4 \text{ pmc}$	$^{13}\text{C} = -0,4\text{‰}$

Błąd oznaczenia ^{14}C wynosi $\pm 1,0 \text{ pmc}$.

Najmłodsze wody w obrębie centralnej i północnej części niecki artezyjskiej Podhala występują w otworze Furmanowa PIG-1. Wiadczy o tym nie tylko najwyższa zawartość ^{14}C , ale przede wszystkim obecność trytu (1,7 TU), co oznacza, że w badanych wodach występuje składowa wód współczesnych o wieku poniżej 50 lat. Jest to tryt pochodzący z opadów atmosferycznych, bowiem wykształcenie litologiczne badanych poziomów wodonośnych wyklucza możliwość produkcji podziemnej trytu (Andrews, Kay, 1982).

Nieco starsze wody (bez zawartości trytu) występują w rejonie otworu Poronin PAN-1, natomiast najstarsze w Chochółowie i w Bańskiej. Ich dokładny „wiek” jest trudny do określenia ze względu na istnienie wymiany izotopowej w głąbiem ziemi roztworem i w gólanami w fazie stałej. Jednak należy pamiętać o składzie izotopowym tych wód jak również o dynamice przepływu wód podziemnych w południowej części basenu podhalańskiego można postawić hipotezę, iż są to wody holoceńskie.

PODSUMOWANIE

Na obszarze Tatr i Podhala zarówno wody podziemne płytko występującego poziomu przypowierzchniowego, jak również wody głębi bokiego kręcenia niecki artezyjskiej Podhala należą do wód typu infiltracyjnego.

Niezależnie od istniejących lokalnych systemów krasowych wody podziemne w obrębie masywu tatrzańskiego pozostają w regionalnej sieci hydraulicznej, tworząc rozległe strefy zasilania niecki artezyjskiej Podhala.

Małe zróżnicowanie składów izotopowych tlenu i wodoru świadczy o bardzo dobrym mieszanin się wód podziemnych w obrębie utworów mezozoicznych orograficznej części Tatr.

Przestrzenne zmiany składu chemicznego wód w obrębie podfliszowych poziomów wodonośnych niecki artezyjskiej Podhala pozostają w ścisłym związku z wiekiem tych wód, określonym na podstawie badań izotopowych.

W obrębie południowego skrzydła niecki artezyjskiej Podhala występują wody bardzo młode, pochodzące z tzw. infiltracji współczesnej, o „wieku” poniżej 50 lat. W części centralnej i północnej niecki występują wody znacznie starsze, prawdopodobnie holoceńskie. Przy obecnym stopniu

rozpoznania nie można wykluczyć występowania tu wód przedholoceniczych, które infiltrowały w warunkach klimatu zbliżonego do obecnego.

W opinii autorów dalsze badania izotopowe powinny przede wszystkim dotyczyć stałej obserwacji zmian stężeń trytu w otworach badawczo-eksploatacyjnych zlokalizowanych w południowej części basenu podhalańskiego, między innymi na terenie Zakopanego, Zasadniej, Furmanowej i Poronina, co pozwoliłoby na precyzyjne wyznaczenie średnich czasów przepływu od stref zasilania oraz określenia parametrów pochodnych.

Drugim istotnym zagadnieniem badawczym na obszarze Tatr jest wyznaczenie efektu wysokościowego składu izotopów stabilnych tlenu i wodoru. Znajomość tej wielkości byłaby niezwykle pomocna przy rozwiązywaniu problemów dotyczących warunków przepływu wód podziemnych w lokalnych systemach krążenia na terenie Tatr.

LITERATURA

- AMIN I.A., CAMPANA E.M., 1996 — A general lumped parameter model for the interpretation of tracer data and transit time calculation in hydrologic systems. *J. Hydrol.*, **179**: 1–21.
- ANDREWS J.N., KAY R.L.F., 1982 — Natural production of tritium in permeable rocks. *Nature*, **298**: 361–363.
- BIRKENMAJER K., 1986 — Zarys ewolucji geologicznej pnieńskiego pasa skałkowego. *Prz. Geol.*, **34**, 6: 293–304.
- CHOWANIEC J., MAŁECKA D., POPRAWA D., 1997a — Wody płytkiego i głębszego krążenia w Tatrach i na Podhalu. *Przew. 68. Zjazdu Pol. Tow. Geol.*: 141–164. Warszawa.
- CHOWANIEC J., DŁUGOSZ P., DROZDOWSKI B., NAGY S., POPRAWA D., WITCZAK S., WITEK K., 1997b — Dokumentacja hydrogeologiczna wód termalnych niecki podhalańskiej. *Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol. Oddz. Karpacki, Kraków*.
- DOWGIAŁŁO J., NOWICKI Z., 1999 — Ocena wieku wód podziemnych na podstawie wybranych metod izotopowych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **388**: 61–79.
- FELTER A., NOWICKI Z., 1997 — Tryt — bezpośredni wskaźnik niskiej wrażliwości warstwy wodonośnej na antropopresję. *Prz. Geol.*, **45**, 9: 862–864.
- GŁAZEK J., WÓJCIK Z., 1963 — Zjawiska krasowe wschodniej części Tatr polskich. *Acta Geol. Pol.*, **13**, 1: 91–118.
- JAWAŃSKI W., 1973 — Charakterystyka spłazmoflisy karpackiego dla modelowania przepływu wody. W: *Z problematyki budownictwa wodnego*: 167–192. PWN, Warszawa–Poznań.
- KAZIMIERSKI B., MAŁECKA D., RÓŹKOWSKI A., 1999 — Cel, metody i wyniki monitoringu wód podziemnych w Polsce. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **388**: 79–114.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.), 1990 — Mapa głównych zbiorników wód podziemnych w Polsce wymagających szczególnej ochrony. *Wyd. AGH, Kraków*.
- KLECZKOWSKI A.S., RÓŹKOWSKI A. (red.), 1997 — Słownik hydrogeologiczny. *Wyd. TRIO, Warszawa*.
- MAŁECKA D., 1981 — Hydrogeologia Podhala. Seria specjalna nr 14: 187s. *Wyd. Geol., Warszawa*.
- MAŁECKA D., 1985 — Znaczenie badań stacjonarnych w rozpoznaniu reżimu hydrogeologicznego ródleń i wywierzyisk krasowych w Tatrach. W: *Aktualne problemy hydrogeologii*: 119–131. *Wyd. AGH, Kraków*.
- MAŁECKA D., 1991 — Opady atmosferyczne jako ważny czynnik kształtujący chemizm wód podziemnych. *Prz. Geol.*, **39**, 1: 14–19.
- MAŁECKA D., 1992 — Główne zbiorniki wód podziemnych Tatr i Podhala. W: *Sztandar polskiej geologii. Mat. Sesji Naukowej poświęconej jubileuszowi prof. A.S. Kleczkowskiego*: 61–69. *Wyd. AGH, Kraków*.
- MAŁECKA D., 1996 — Hydrogeologiczna charakterystyka Tatr w świetle badań monitoringowych. *Mat. I Ogólnopolskiej Konf. Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a człowiek. Stan i perspektywy badań tatrzańskich*: 19–30. *Wyd. TPN, Kraków*.
- MAŁECKA D., LIPNIACKA T., 1990 — Sieć hydrogeologiczna obserwacji stacjonarnych na Podhalu — założenia i wstępna interpretacja wyników. *Prz. Geol.*, **38**, 11: 484–491.

- MAŁECKA D., MAŁECKI J.J., 1996 — The Tatras — a reservoir of groundwaters of high quality. *Pr. Nauk. U Ł.*, **1563**: 116–127.
- MAŁECKA D., MAŁECKI J.J., 1998 — Monitoring wód podziemnych w rozpoznaniu regionalnych warunków hydrogeologicznych okolic Zakopanego. *Mat. II Forum Inżynierii Ekologicznej*: 383–392. Wyd. Eko-Inżynieria, Lublin.
- MAŁECKA D., MAŁECKI J.J., 2000 — Udział opadów atmosferycznych w kształtowaniu chemizmu wód strefy hiperogenicznej. W: Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce: 71–87. Wyd. UŁódz., Łódź.
- MAŁECKA D., MURZYNOWSKI W., 1978 — Rejonizacja hydrogeologiczna Karpat fliszowych. *Bibl. Wiad. IMUZ*, **56**, 49: 44–46.
- MAŁECKA D., RONIEWICZ P., 1997 — Sedymentacja eocenu w gólanego oraz hydrogeologia podnó a Tatr, problemy zaopatrzenia Zakopanego w wodę. *Przew. 68. Zjazdu Pol. Tow. Geol.*: 73–92. Warszawa.
- MAŁOSZEWSKI P., ZUBER A., 1997 — Modele matematyczne i program komputerowy do interpretacji zależności cięci czasowych stężeń trytu i innych znaczników w wodach podziemnych. W: Współczesne problemy hydrogeologii. T. 8: 471–473. Wyd. WIND, Wrocław.
- NIEDZIELSKI H., 1974 — Wodochłonność skał fliszowych w wybranych regionach Karpat. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, **44**, 1: 115–139.
- NOWICKI Z., 1992 — Geneza i wiek wód geotermalnych pochodzących z otworu Bańska IG-1. *Arch. OBRTG*, Warszawa.
- NOWICKI Z., SOŁTYK W., 1973 — Badania stężeń trytu w otworze Zakopane IG-1. *Dokumentacja. Arch. PH*, Warszawa.
- RONIEWICZ P., 1969 — Sedymentacja eocenu numulitowego Tatr. *Acta Geol. Pol.*, **19**, 3: 503–608.
- RÓŹAŃSKI K., DULSKI M., 1988 — A reconnaissance isotope study of waters in the karst of the western Tatra Mountains. *Catena*, **15**: 289–301.
- RÓŹAŃSKI K., GONFIANTINI R., ARAGUAS-ARAGUAS L., 1991 — Tritium in the global atmosphere: distribution patterns and recent trends. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **17**: 523–536.
- RUDNICKI J., 1967 — Geneza i wiek jaskiń Tatr Zachodnich. *Acta Geol. Pol.*, **17**, 4: 521–593.
- SOKOŁOWSKI S., 1959 — Zarys geologii Tatr. *Biul. Inst. Geol.*, **149**: 19–94.
- ZUBER A., 1986 — Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. W: P. Fritz, J.Ch. Fontes (red.), *Handbook of environmental isotope geochemistry*, t. 2: 60s. Elsevier, Amsterdam.