

Tatrzański Park Narodowy
Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi – Oddział Krakowski

Nauka Tatrom

Tom I

Nauki o Ziemi



Redakcja
Anna Chrobak, Adam Kotarba

Materiały V Konferencji
PRZYRODA TATRZAŃSKIEGO PARKU NARODOWEGO A CZŁOWIEK
Zakopane, 24–26 września 2015 roku

Badania izotopowe w Tatrach. Sezonowa dynamika składu izotopowego wód Wywierzyska Olczyskiego

Isotope hydrology research in the Tatra Mts. Seasonality of isotopic composition of the vaucluse Olczyskie Spring

Joanna P. Siwek¹, Joanna Pociask-Karteczka¹, Przemysław Wachniew²

¹ Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, e-mail: joanna.siwek@geo.uj.edu.pl, joanna.pociask-karteczka@uj.edu.pl

² Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, 30-059 Kraków, ul. Reymonta 19, e-mail: wachniew@agh.edu.pl

Streszczenie

Znaczniki środowiskowe, do których należą m.in. izotopy wodoru i tlenu, mają duże znaczenie w badaniach zmierzających do określenia genezy wód podziemnych, szczególnie rozpoznania regionalnych warunków ich krążenia i drenażu, a także ilościowej i jakościowej charakterystyki. Odnosi się to również do górskich obszarów krasowych, w obrębie których krążenie wody jest dość skomplikowane. Badane Wywierzysko Olczyskie zasilające Potok Olczyski, leży w obrębie węglanowej części Tatr. Jest to jedno z najbardziej spektakularnych i największych pod względem wydajności źródeł w Tatrach. Odpływ ze zlewni Potoku Olczyskiego prawie dwukrotnie przewyższa wielkość opadów atmosferycznych, a wskaźnik średniego rocznego podziemnego odpływu jednostkowego ($25 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) należy do największych w Tatrach. Wynika to przede wszystkim z dopływu wody spoza zlewni, tj. z Doliny Pańszczycy. Badania prowadzono od czerwca 2010 r. do maja 2011 r. Próby wody z wywierzyska pobierano raz na miesiąc. Ponadto w analizie uwzględniono dwutygodniowe sumy opadów atmosferycznych (deszczu i śniegu) gromadzonych na stacji meteorologicznej na Hali Gąsienicowej. Wykorzystano obserwacje zawartości znaczników izotopowych $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$. Określono pH, przewodność elektrolityczną właściwą i główne jony. Analizy chemiczne i izotopowe zostały wykonane w Laboratorium Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ oraz w Laboratorium Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Skład izotopowy wód Wywierzyska Olczyskiego nie wykazuje wyraźnych zmian sezonowych. Zaobserwowano natomiast sezonowe zmiany składu izotopowego opadów na Hali Gąsienicowej. W półroczu zimowym (od listopada do kwietnia) wody opadowe charakteryzowały się niższym udziałem izotopów ciężkich $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ (odpowiednio: -12,9‰ i -93,9‰) niż w półroczu letnim (odpowiednio: -11,7‰ i -79,6‰). Te

zmiany nie znalazły odzwierciedlenia w składzie izotopowym Wywierzyska Olczyskiego. Różnica między $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w wywierzysku latem i zimą była niewielka: odpowiednio 0,07 i 0,02‰. Zmiany składu izotopowego ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) wód Wywierzyska Olczyskiego w ciągu roku wskazywały na brak dostawy wód krótkiego krążenia do systemu wywierzyskowego w czasie zimy. Świadczyły o tym stosunkowo wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w wodach wywierzyska, podczas gdy ich udział w wodach opadowych należał do najniższych w ciągu roku. Zimą dochodziło do czasowego zatrzymania zasilania systemu wywierzyskowego; woda opadowa była magazynowana w pokrywie śnieżnej i uwalniana dopiero w trakcie roztopów.

Słowa kluczowe: obieg wody, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, kras, Tatry

Abstract

Studies on hydrogeology in Tatra using environmental isotopic tracers were carried out only occasionally. Presented study was performed in the Olczyskie Creek catchment (4.7 km^2) at the elevation 890–1642 m a.s.l. The geology of the catchment comprises crystalline granitic rocks, karstified limestone, dolomite and Quaternary glacial sediments. Vaucluse spring water in the catchment was sampled once a month from June 2010 to May 2011. Electrical conductivity, pH, main ions, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ were measured. Samples of precipitation were collected twice a month in the high mountain recharge area of the spring at the elevation 1520 m a.s.l. Seasonal changes in the isotopic composition of precipitation collected at the Gąsienicowa Alp was observed. During the cool half year from November to April precipitation (snowmelt water) were characterized by a lower share of the heavy isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ (respectively: -12.9‰ and -93.9‰) than in the warm half year, from May to October (respectively: -11.7‰ and -79.6‰). And

these changes were not reflected in changes in the isotopic composition of the Olczyskie vaucluse spring. Differences in the average share of the heavy isotope $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in the Olczyskie vaucluse spring between cool and warm half years were negligible and amounted respectively 0.07‰ and 0.02‰. Stable isotopic dynamic in the spring water reflected relatively rapid inflow of rain- and snowmelt water to the karstic system. This is indicated by greater similarity of stable isotopic composition of spring water and precipitation water during the rainfall and snowmelt periods. The spring are thus potentially vulnerable to the anthropogenic pollution.

Keywords: water circulation, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, karst, the Tatra Mountains

Wstęp

Skład izotopowy wód wykorzystywany jest w metodach znacznikowych. W hydrologii znajdują one zastosowanie w rozwiązywaniu wielorakich problemów, takich jak datowanie wód, określanie typów genetycznych oraz kierunku i prędkości przepływu wód podziemnych. Znacznikowe metody izotopowe pozwalają również na badanie związków między wodami powierzchniowymi i podziemnymi oraz określanie obszarów zasilania wód podziemnych. Z tej różnorodności wynika znaczna aplikacyjność wspomnianych metod – mogą one bowiem służyć m.in. do określania kierunku i prędkości rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, wyznaczania stref ochronnych dla ujęć wód, rozpoznania wielkości dopływu wód do kopalń. Są także bardzo pomocne w formułowaniu, weryfikacji i kalibracji modeli hydrogeologicznych (Kendall i McDonnell, 1998). W drugiej połowie XX stulecia w badaniach hydrologicznych i hydrogeologicznych zaczęto wykorzystywać znaczniki środowiskowe, szczególnie izotopy trwałe tlenu i wodoru (odpowiednio stosunki $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ i $^2\text{H}/^1\text{H}$) oraz stężenie trytu (zawartość ^3H w cząsteczkach H_2O). Mają one podstawowe znaczenie dla określenia genezy wód podziemnych, szczegółowego rozpoznania regionalnych warunków ich krążenia i drenażu, a także ilościowej i jakościowej charakterystyki (Zuber i in., 2008). W badaniach hydrogeologicznych wykorzystuje się także analizę gazów szlachetnych He, Ne i Ar, których stężenie jest uzależnione od wieku wody (Chowaniec i in. 2009, 2010).

Terenami o szczególnie interesującym systemie krążenia wody są górskie obszary krasowe. Przykład stanowią Tatry, gdzie w sąsiedztwie węglanowych formacji osadowych występują krystaliczne skały magmowe. Skutkuje to skomplikowanymi drogami migracji wód różnego pochodzenia (Gradziński i in., 2009; Pociask-Karteczka i in., 2010; Wachniew i in., 2012). W wodach wywierzyisk tatrzańskich odzwierciedla się wpływ zarówno atmosferycznej fazy krążenia wody, jak i różnorodnych środowisk geochemicznych występujących w obrębie tego masywu górskiego (Małecka i Humnicki, 1989; Małecka, 1997; Barczyk, 2008; Wołanin i Żelazny, 2010; Żelazny, 2012).

Celem opracowania jest przegląd dotychczasowych badań na temat składu izotopowego wód w Tatrach ze szczególnym uwzględnieniem zlewni Potoku Olczyskiego oraz przedstawienie wyników badań izotopowych przeprowadzonych w tej zlewni w latach 2010–2011.

Przegląd dotychczasowych badań

Historia badań składu izotopowego wód tatrzańskich, które znalazły odzwierciedlenie w publikacjach naukowych nie jest zbyt długa i jej początek datuje się na koniec lat 80. XX wieku, kiedy Różański i Duliński (1988) opublikowali artykuł na temat „dynamiki i struktury przepływów podziemnych” w systemach krasowych Tatr Zachodnich. Nie oznacza to jednak, iż wcześniej nie wykonywano analiz izotopowych w wodach tatrzańskich. Czyniono to zwykle przy okazji odwiertów podczas prac poszukiwawczych wód geotermalnych w celu rozpoznania ich genezy i wieku. Przewidywany wzrost wykorzystania tych wód wymagał dokładnego rozpoznania stref zasilania i wymiany, co było istotne w kontekście ochrony przed nadmierną eksploatacją i degradacją.

Pierwsze badania izotopowe, przeprowadzone w sierpniu 1969 r. przez Dział Radiometrii Przedsiębiorstwa Hydrogeologicznego z Warszawy, dotyczyły próbek wód podziemnych z otworu Zakopane IG-1. Dokonano wówczas oznaczenia trytu. Udało się uchwycić moment pojawienia się w otworze wody zawierającej tryt pochodzący z okresu prób z bronią jądrową w atmosferze. W pierwszym roku obserwacji stężenie trytu było na poziomie kilku TU (*tritium unit* – miara stężenia trytu w wodzie), w kolejnych 2 latach wzrosło do prawie 200 TU, po czym spadło do wartości ok. 120 TU (Nowicki i Sołtyk, 1973). Gdy w latach 1986–1988 wykonywano kolejne oznaczenia, stężenie trytu wynosiło od 20 do 24 TU. Na podstawie porównania zmian stężenia trytu w otworze Zakopane IG-1 i w opadach atmosferycznych średni czas dopływu wód podziemnych ze stref zasilania oszacowano na ok. 19 lat. Czas ten byłby zapewne dłuższy, gdyby nie eksploatacja otworu (Małecka i Nowicki, 2002).

We wspomnianym już opracowaniu Różańskiego i Dulińskiego (1988) opisano wyniki regularnych badań hydrochemicznych prowadzonych od października 1983 r. do stycznia 1986 r. w Dolinie Kościeliskiej i Dolinie Chochołowskiej. Badaniom składu izotopowego (tryt, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) miesięcznych sum opadów na hali Ornak towarzyszyły badania wód źródłanych i rzecznych oraz wycieków w jaskiniach. Równolegle prowadzono badania składu izotopowego opadów w Krakowie. Zaobserwowano ścisły związek między stężeniami trytu, ^{18}O i ^2H na hali Ornak oraz w Krakowie (w przypadku trytu $r = 0,85$). Najwyższe wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w wodach opadowych występowały latem i wynosiły odpowiednio -7,6‰ i -46‰, natomiast najniższe wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ odnotowano zimą: odpowiednio ok. 18‰ i ok. -135‰. Wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w opadach na hali Ornak były niższe niż w opadach w Krakowie, co potwierdza powszechnie występujące zjawisko zubożania wód opadowych w izotopy ^2H i ^{18}O wraz ze wzrostem wysokości

nał poziomem morza. W przypadku Krakowa i hali Ornak wielkość deniwelacji wynosi ok. 900 m. Efekt wysokościowy $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ jest równy odpowiednio 0,24 i 1,4‰ na 100 m wysokości, tj. znacznie mniejszy niż wartości przeciętne na świecie (odpowiednio 0,15–0,5‰ i 1,5–4‰ na 100 m wysokości). Biorąc pod uwagę wielkość deniwelacji w Tatrach i na Podhalu, różnice te powinny wynosić 20–25‰, tymczasem nie przekraczają 10‰, a przy uwzględnieniu położenia Krakowa – ok. 15‰. Zredukowany efekt wysokościowy występuje w wielu pasmach górskich, zwłaszcza tych, które nie stanowią zasadniczej przeszkody dla ruchu mas powietrza.

Podwyższone stężenie trytu w opadach notowano w miesiącach wiosennych i letnich. W wodach jaskiń, źródeł i potoków daje się zauważyć porządek odwrotny: wyższe stężenie trytu występowało zimą, co świadczy o przewodze w tym czasie głębokiego zasilania podziemnego. Wiosną i latem stężenie trytu było mniejsze, ponieważ w krążeniu biorą wtedy udział świeże wody roztopowe i deszczowe. Według Różańskiego i Dulińskiego (1988) skład izotopowy wód świadczy o przewodze wpływu infiltracji letniej w zasilaniu wód podziemnych. Na przykład w maju 1985 r. udział wód „świeżych” w wodach podziemnych wynosił 85%. Interesujące wydaje się nadzwyczaj wysokie stężenie trytu w wyciekach Jaskini Miętusiej i Potoku Miętusim (40–50 TU). Świadczy ono o istnieniu w tej zlewni odrębnego systemu krasowego, niezależnego od reszty zlewni Potoku Kościeliskiego.

Wielkość $\delta^{18}\text{O}$ oraz $\delta^2\text{H}$ w wyciekach jaskiniowych przewyższa wartości średnie charakterystyczne dla wód opadowych w ciągu roku, natomiast wody źródeł i potoków swoim składem są zbliżone do opadów (tab. 1). Podobieństwo wód źródłanych i rzecznych do wód opadowych pod względem ilości izotopów trwałych można wyjaśnić znacznym udziałem w obiegu wód roztopowych (czyli wód z opadów zimowych), cechujących się niskimi zawartościami ^2H i ^{18}O . Jednak brak efektu sezonowości ^2H w wodach źródłanych i rzecznych podważa tę hipotezę. Według Różańskiego i Dulińskiego (1988) głównym procesem wpływającym na podwyższenie wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w wyciekach jaskiniowych jest wymiana izotopowa. Może ona zachodzić w warunkach braku równowagi izotopowej między wodami wycieków i parą wodną w jaskini. Para wod-

na winna charakteryzować się podwyższoną zawartością izotopów ciężkich. Wystąpienie takiej sytuacji jest prawdopodobne w miesiącach letnich, kiedy może dochodzić do napływu pary wodnej nasyconej izotopami ciężkimi, czemu sprzyja znaczny gradient wilgotności między środowiskiem atmosferycznym otwartej przestrzeni i wnętrzem jaskini. Z nieznanymi przyczynami wycieków są zbliżone pod względem $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ do wód opadowych z sezonu letniego. Umożliwiło to Różańskiemu i Dulińskiemu (1988) oszacowanie współczynnika infiltracji wód opadowych z sezonu letniego w stosunku do całkowitej rocznej infiltracji opadów. Wyniósł on 0,76. Do tego wyniku należy jednak podchodzić ostrożnie, gdyż rozkład $\delta^2\text{H}$ w wodach wycieków jaskiniowych jest wyraźnie bimodalny. Być może wpływa na to efekt wysokościowy, zaniedbany przy obliczaniu współczynnika infiltracji. Uwzględnienie poprawki okazuje się trudne, ponieważ wysokość obszarów, na których rozpoczyna się infiltracja, jest zróżnicowana i trudna do dokładnego ustalenia. Dlatego też wartość tego współczynnika należy traktować jako orientacyjną.

Drugie ważne opracowanie ukazało się 30 lat później i dotyczyło obszarów zasilania największych źródeł tatrzańskich (Zuber i in., 2008). Autorzy przedstawili wyniki badań izotopowych (^3H , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) wód źródłanych w Tatrach oraz na ich przedpolu z lat 1977–2001. Głównym celem pracy było określenie wieku wód krążących w obrębie badanego terenu i zasięgu stref zasilania głębokich wód występujących w niecce podhalańskiej. Do interpretacji izotopowych znaczników środowiskowych wykorzystano matematyczny model pudełkowy stworzony przez Małyszewskiego i Zuberę (1982, 1986, za: Zuber i in., 2008). Badaniem objęto 13 źródeł tatrzańskich (wywierzyska i źródła o średniej wydajności – głównie źródła znajdujące się w obrębie eocenu węglanowego) oraz wody z pięciu odwiertów na przedpolu Tatr (w Zakopanem). Analiza trytu wykazała, iż najdłuższym czasem dopływu cechowały się wody z odwiertu IG-1 Skocznia, które zalegały na głębokości 700 m. W odwiercie tym stwierdzono wody dwojakiego rodzaju: ponad 80% stanowiły stare wody porowe uwolnione z matrycy skalnej, których średni wiek oszacowano na ok. 100 lat, a 17% – wody młode (średnio ok. 9 lat), szybko przemieszczające się kanałami krasowymi. Wyniki te różnią się od uzyskanych w latach 1969–1973, kiedy czas dopływu

Tab. 1. Średnia zawartość $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ w wodach w Tatrach Zachodnich w okresie od października 1983 r. do stycznia 1986 r. (za: Różański i Duliński, 1988)

Tab. 1. *The average values of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the water in the Western Tatra Mountains from October 1983 to January 1986 (after: Rozanski and Dulinski, 1988)*

Rodzaj wody	Stacja	Liczebność próbek	$\delta^2\text{H}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	d' – wskaźnik nadmiaru ^2H
Opady**	hala Ornak	24	-77,6 ± 5,6	-11,26 ± 0,71	12,5 ± 2,1
	Kraków	24	-64,9 ± 5,9	-9,12 ± 0,77	5,4 ± 1,7
Źródła i potoki		43	-77,6 ± 0,4	-11,59 ± 0,04	15,1 ± 0,5
Wycieki w jaskiniach		19	-71,3 ± 0,9	-10,64 ± 0,13	13,6 ± 1,4

* $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$

** średnia ważona ^2H i ^{18}O (jako wagę zastosowano sumy miesięczne opadów)

wody ze stref zasilania do otworu Zakopane IG-1 oceniono na ok. 19 lat (Małecka i Nowicki, 2002).

Próbki wód źródłanych pobierano w okresach niżówkowych, co zapewniało jednorodny system zasilania z głębokiego systemu krążenia (wody porowe i szczelinowe). Autorzy stwierdzili, iż skład izotopowy wód źródłanych w Tatrach jest zróżnicowany głównie wskutek różnicowanej wysokości bezwzględnej obszarów zasilania tych źródeł. Gradient wysokościowy w przypadku $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ wynosi odpowiednio $-0,21\text{‰}$ i $-1,45\text{‰}$ na 100 m. Obszary zasilania wywierzysk o dużych wydajnościach leżą na dużo większych wysokościach niż obszary zasilania źródeł o wydajnościach średnich. Średnie czasy dopływu wód podziemnych ze stref zasilania otrzymane w wyniku zastosowania różnych modeli pudełkowych były zróżnicowane – wynosiły

od ok. 3 do ok. 141 lat (tab. 2). Zuberowi i in. (2008) udało się oszacować porowatość wodonośca drenowanego przez wywierzyska (0,02) i współczynnik filtracji ($1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Na uwagę zasługuje także przeglądowa praca Małeckiej i Nowickiego (2002), w której przedstawiono pochodzenie i wiek wód podziemnych Tatr i Podhala. Charakterystykę składu izotopowego $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ wód podziemnych przeprowadzono na podstawie opróbowań z lat 1986–1988. Badaniami objęto źródła odwadniające serie osadowe Tatr, źródła odwadniające utwory eocenu węglanowego oraz wody z otworów wiertniczych reprezentujących flisz podhalański, pieniński pas skałkowy i utwory w Kotlinie Nowotarskiej (tab. 3). Ponadto wykorzystano wyniki oznaczeń izotopowych zawarte w pracy Różańskiego i Dulińskiego (1988), materiałach archiwalnych Działu Radiometrii Przedsię-

Tab. 2. Wiek wód i wysokość obszarów zasilania tatrzańskich źródeł (za: Zuber i in., 2008)

Tab. 2. *The age of water and elevation of the recharge area of the vaucluse springs in the Tatra Mountains (after: Zuber et al., 2008)*

Źródło	Wysokość [m n.p.m.]	Wiek wód	Wysokość obszaru zasilania oszacowana na podstawie ^{18}O [m n.p.m.]	Wysokość obszaru zasilania oszacowana na podstawie ^2H [m n.p.m.]
Wywierzysko Bystrej	1165–1170	x	1574 ± 207	1574 ± 207
Wywierzysko Goryczkowe	1185	x	1581 ± 200	1581 ± 200
Wywierzysko Olczyskie	1067	x	1381	1464
Lodowe Źródło	974	x	1394	1225
Wywierzysko Chochołowskie	988	3 lata 5 lat (?)	1491	1335
Koziarczyska	942	6,5 roku	1350	1301
Pod Kopką (Kiry)	920	74 lata	1012 ± 46	1012 ± 46
Pod Capkami	915	11 lat 141 lat (?)	1146 ± 115	1146 ± 115
Barany	919	11,4 roku	1252	1163
Baptystów	915	x	1247	1194
Waksmundzkie	1074	x	1247	1267
w Stanikowym Źlebie	967	x	1217	1111
Przyporniak	950	x	1230	1163

? – wyniki wątpliwe

x – brak szacunków ze względu na niewystarczające dane trytowe

Tab. 3. Skład izotopowy wód źródłanych w Tatrach (za: Małecka i Nowicki, 2002; zmienione)

Tab. 3. *The isotopic composition of spring water in the Tatra Mountains (after: Malecka and Nowicki, 2002; changed)*

Lokalizacja geologiczna badanych źródeł	Liczebność próby	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]			$\delta^2\text{H}$ [‰]		
		min.	maks.	śr.	min.	maks.	śr.
Seria osadowa	12	-12,2	-11,1	-11,7	-82,7	-75,6	-80,4
Eocen węglanowy	17	-11,4	-10,6	-11,1	-79,2	-72,7	-75,4
Flisz Podhala		-11,3	-11,1	-11,2	-79,2	-78,0	-78,6
Pieniński 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

biorstwa Hydrogeologicznego w Warszawie i dokumentacji hydrogeologicznej Polskiego Instytutu Geologicznego (Chowaniec i in., 1997, za: Małecka i Nowicki, 2002).

Według Małeckiej i Nowickiego (2002) spośród wszystkich czynników mających bezpośredni wpływ na skład izotopowy wód infiltrujących na obszarze Tatr, takich jak efekt kontynentalny, temperaturowy, sezonowy i wysokościowy, największe znaczenie mają pochodne efektu temperaturowego, tj. efekt wysokościowy i sezonowy. Położenie punktów ilustrujących średni skład izotopowy wód podziemnych Tatr i Podhala w latach 1986–1988 w układzie współrzędnych $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ na tle prostej Craiga świadczy o tym, że zarówno w obrębie poziomu przypowierzchniowego, jak i w poziomach podfliszowych występują jedynie wody infiltracyjne. Zmiany sezonowe składu $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ są bardzo nieznaczne, na ogół nie przekraczają wartości odpowiednio 0,5 i 3,5‰, co świadczy o bardzo dobrym mieszanii się wód podziemnych w obrębie utworów mezozoicznych masywu tatrzańskiego. Wody podziemne Tatr i Podhala, zarówno płytko występującego poziomu przypowierzchniowego, jak i głębokiego krążenia w niecce podhalańskiej, należą do wód typu infiltracyjnego i tworzą rozległą strefę, w której istnieje więź hydrauliczna. Oprócz tego funkcjonują lokalne, niezależne od niej systemy krasowe. W południowej części niecki występują wody bardzo młode o wieku poniżej 50 lat, zaś w częściach centralnej i północnej – znacznie starsze, niewykluczone, że przedholocenyckie.

Osobną grupę opracowań stanowią publikacje dotyczące słowackiej części Tatr. Szczegółowe badania hydrologiczne, w tym izotopowe, prowadzone są w zlewni Jałowieckiego Potoku (Tatry Zachodnie). Analiza wezbrań i opadów w latach 1991–2002 z wykorzystaniem $\delta^{18}\text{O}$ pozwoliła na oszacowanie średniego czasu dobiegu wód na 13 miesięcy (Holko i Kostka, 2006). Badania wykazały zróżnicowanie wysokościowe składu izotopowego opadów. Średni gradient wysokościowy w przypadku $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ wyniósł odpowiednio -0,14‰ i -0,7‰ na 100 m. Skład izotopowy wód roztopowych i rzecznych w początkowej fazie roztopów okazał się bardzo podobny, toteż nie było możliwości wykorzystania izotopów w celu genetycznego rozdziału hydrogramu. Chociaż podczas roztopów pokrywa śnieżna nie wykazywała zróżnicowania pionowego pod względem $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$, to jednak najlepszą charakterystykę izotopową wód zasilających obieg wody podczas roztopów dawała warstwa powierzchniowa pokrywy śnieżnej (Holko, 1995a, 1995b; Holko i Kostka, 2010). W sierpniu 2009 r. poddano analizie hydrogramy pięciu fal wezbraniowych, przy czym $\delta^{18}\text{O}$ wykorzystano w celu oszacowania powierzchni, z której dochodziło do zasilania wezbrań w formie spływu powierzchniowego. Okazało się, że udział tzw. wód starych w formowaniu fal wezbraniowych wyniósł od 73 do 100%, a obszar nasycony wodą, gdzie formował się spływ powierzchniowy, stanowił od 2 do 13% powierzchni zlewni. Zróżnicowanie $\delta^2\text{H}$ w opadach na wysokości 1500 m n.p.m. wynosiło od -53,8 do -26,7‰, w wodach podziemnych (źródłanych) – od -79,3 do -77,0‰, natomiast wartość $\delta^2\text{H}$ w wodzie potoku przed wystąpieniem wezbrania była równa -79,8‰ (Holko i in., 2011). Ciekawe wyniki

przyniosły także badania składu izotopowego śniegu w sezonach zimowych 2011 i 2012 w powiązaniu z procesami hydrologicznymi w dorzeczu górnego Wagu (Holko i in., 2013). Nieoczekiwanie okazało się, iż gradient wysokościowy $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w przypadku większości opadów śniegu jest ujemny. Przestrzenne zróżnicowanie składu izotopowego pokrywy śnieżnej w trakcie zim ubogich w opady było znacznie większe aniżeli w trakcie zim wyjątkowo śnieżnych. Dało się zauważyć wpływ składu izotopowego w potokach niższych rzędów na reżim izotopowy Wagu.

Obszar, okres i metoda badań

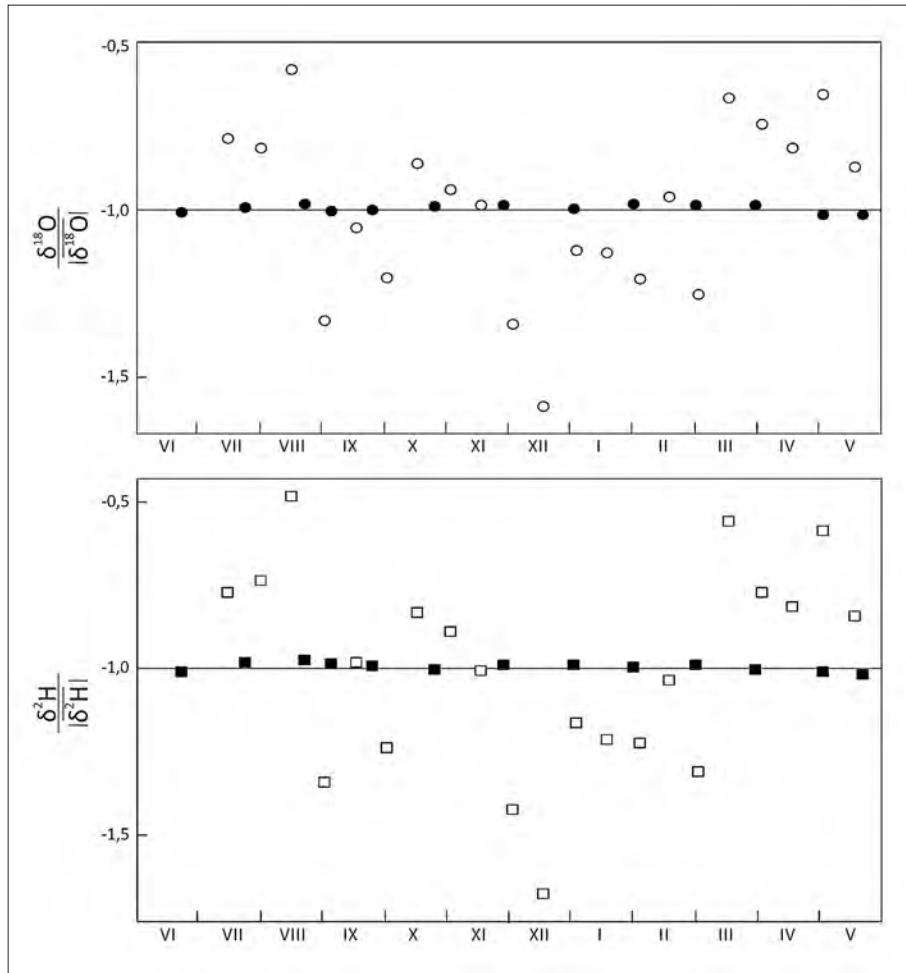
Wywierzysko Olczyjskie, zasilające Potok Olczyjski, to jedno z największych pod względem wydajności źródeł w Tatrach. Odpływ ze zlewni Potoku Olczyjskiego prawie dwukrotnie przewyższa wielkość opadów atmosferycznych, a wskaźnik średniego rocznego podziemnego odpływu jednostkowego ($25 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) należy do najwyższych w Tatrach. Wynika to przede wszystkim z dopływu wody spoza zlewni, tj. z Doliny Pańszczycy (Łajczak, 1988; Małecka, 1996). Choć zlewnia Potoku Olczyjskiego zbudowana jest głównie z utworów węglanowych, wody odprowadzane przez główny potok mają cechy wód występujących w części krystalicznej Tatr.

Badania prowadzono od czerwca 2010 r. do maja 2011 r. Próby wody z wywierzyska pobierano raz na miesiąc, a próby opadu atmosferycznego całkowitego gromadzonego na stacji meteorologicznej na Hali Gąsienicowej – raz na 2 tygodnie. Zimą deszczomierz był ogrzewany. W próbkach wód wykonano oznaczenia izotopów $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ metodą spektrometrii mas (Laboratorium Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH) oraz pH, przewodności elektrycznej właściwej i stężenia głównych jonów – metodą chromatografii jonowej (Laboratorium Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ).

Wyniki i dyskusja

Zmiany składu izotopowego wód Wywierzyska Olczyjskiego w okresie od czerwca 2010 r. do maja 2011 r. były niewielkie: mieściły się w zakresie od -11,6‰ do -12‰ w przypadku $\delta^{18}\text{O}$ i od -79,4‰ do -83,1‰ w przypadku $\delta^2\text{H}$. Podobną zmienność składu izotopowego w wodach potoków i źródeł zlewni Potoku Kościeliskiego i Potoku Chochołowskiego stwierdzili Rózański i Duliński (1988) w czasie badań przeprowadzonych w latach 1983–1986. Niewielką zmienność składu izotopowego wód Wywierzyska Olczyjskiego potwierdzają niskie wartości współczynników zmienności, które w przypadku zarówno $\delta^{18}\text{O}$, jak i $\delta^2\text{H}$ wynoszą -0,01. Dla porównania: współczynniki zmienności parametrów fizykochemicznych (przewodności elektrycznej właściwej i głównych jonów) w próbkach wód pobranych w tym samym czasie, w którym pobierano próbki do oznaczeń izotopowych, były wielokrotnie wyższe – mieściły się w zakresie od 0,10 do 0,41.

Skład izotopowy ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) wód Wywierzyska Olczyjskiego nie wykazywał wyraźnej zmienności o charakterze



Ryc. 1. Względne zmiany składu izotopowego ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) wód Wywierzyska Olczyskiego (pełne sygnatury) i wód opadowych zebranych na Hali Gąsienicowej (puste sygnatury) w okresie od czerwca 2010 r. do maja 2011 r.

Fig. 1. Relative changes in the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of the Olczyskie vaucuse spring (filled signature) and precipitation collected on Gąsienicowa Alp (empty signature) from June 2010 to May 2011

sezonowym. Sezonowość zaznaczała się natomiast w składzie izotopowym opadów atmosferycznych pobieranych na Hali Gąsienicowej (ryc. 1). W półroczu chłodnym, od listopada do kwietnia, wody opadowe charakteryzowały się mniejszym udziałem ciężkich izotopów $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ (odpowiednio $-12,9\text{‰}$ i $-93,9\text{‰}$) niż w półroczu ciepłym, od maja do października (odpowiednio $-11,7\text{‰}$ i $-79,6\text{‰}$). Sezonowe zmiany składu izotopowego opadów atmosferycznych nie miały odzwierciedlenia w zmianach składu izotopowego wód Wywierzyska Olczyskiego. Różnice w średnim udziale ciężkich izotopów $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w wodach Wywierzyska Olczyskiego między półroczem chłodnym i ciepłym były znikome – odpowiednio $0,07\text{‰}$ i $0,02\text{‰}$.

W wodach Wywierzyska Olczyskiego zaznaczył się jednak niewielki spadek wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w trakcie podwyższonych przepływów wezbraniowych: podczas wezbrania deszczowego w lipcu 2010 r. oraz wiosennych wezbrań roztopowych w kwietniu i maju 2011 r. Świadczy to o docieraniu do Wywierzyska Olczyskiego wód krótkiego krążenia – deszczowych i roztopowych. Wody opadowe

zebrane w postaci deszczu lub śniegu na Hali Gąsienicowej cechowały się niższymi średnimi wartościami $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ (odpowiednio $-12,39\text{‰}$ i $-87,74\text{‰}$) niż wody wypływające z wywierzyska (odpowiednio $-11,75\text{‰}$ i $-81,12\text{‰}$). O docieraniu do Wywierzyska Olczyskiego wód deszczowych lub roztopowych świadczą także zmiany cech fizykochemicznych: w wyniku dopływu słabozmineralizowanych wód krótkiego krążenia przewodność elektryczna właściwa i stężenie większości głównych jonów w wodach wywierzyska malały.

Zmiany składu izotopowego wód Wywierzyska Olczyskiego w ciągu roku wskazywały na brak dostawy wód krótkiego krążenia do systemu wywierzyskowego w zimie. Świadczyły o tym stosunkowo wysokie wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w wodach wywierzyska, podczas gdy ich udział w wodach opadowych należał do najniższych w ciągu roku. Zimą dochodziło do czasowego zatrzymania zasilania systemu wywierzyskowego; woda opadowa była magazynowana w pokrywie śnieżnej i uwalniana dopiero w trakcie roztopów. Warto dodać, iż uwzględnienie w analizie ^3H w wodach

Wywierzyśka Olczyskiego pozwoliło na oszacowanie średniego czasu przebywania wody w górotworze na 20,5 roku (Kosiarz, 2012; Wachniew i in., 2012).

Zakończenie

Metody izotopowe – lub szerzej: metody wykorzystujące znaczniki środowiskowe – stanowią ważne, lecz niedostatecznie doceniane narzędzie badawcze uzupełniające tradycyjne metody stosowane w hydrologii. Ważną cechą metod izotopowych jest to, że w syntetyczny sposób przekazują informacje na temat funkcjonowania systemów hydrologicznych w szerokim zakresie skal przestrzennych i czasowych. Na przykład obserwacje składu izotopowego wody źródeł na obszarach górskich pozwalają wskazać przedział wysokościowy obszarów ich zasilania i oszacować średni wiek wypływającej z nich wody. Interpretacja danych izotopowych jest zwykle łatwiejsza i daje bardziej wiarygodne wyniki jeżeli jest prowadzona w kontekście obserwacji przeprowadzonych wcześniej oraz przy uwzględnieniu wyników badań z obszarów sąsiednich. Wykorzystanie przedstawionych w niniejszej pracy wyników badań obejmujących jeden rok obserwacji izotopowych wód Wywierzyśka Olczyskiego było możliwe tylko dzięki istnieniu wcześniejszych obserwacji tego i innych tatrzańskich źródeł oraz dzięki zbieranej równolegle informacji o składzie izotopowym opadów atmosferycznych.

Podziękowanie

Autorzy składają serdeczne podziękowania Markowi Kotlarczykowi i Januszowi Konieczkowi – pracownikom Stacji Naukowej IGIPIZ PAN na Hali Gąsienicowej oraz Agnieszce Baran – za bardzo cenną pomoc podczas badań terenowych.

Literatura

- Barczyk G., 2003, *Circulation in present-day karst systems sourcing the vauclose springs in the Polish Tatra Mts., based on tracer methods and limnometric observations*, „Geological Quarterly”, 47(1): 97–106.
- Barczyk G., 2008, *Tatrzańskie wywierzyśka. Krasowe systemy wywierzyśkowe Tatr Polskich*, Zakopane, Wydawnictwa Tatrzańskiego Parku Narodowego.
- Chowaniec J., Duliński M., Mochalski P., Najman J., Śliwka I., Zuber A., 2009, *Rezultaty analiz gazów szlachetnych w wodach termalnych niecki podhalańskiej*, „Przeegl. Geolog.”, 57, 8, s. 652.
- Chowaniec J., Duliński M., Mochalski P., Najman J., Śliwka I., Zuber A., 2010, *Water ages in thermal system of the Podhale Basin (Inner Carpathians, Southern Poland)*, „Biuletyn PIG”, 44, s. 7–18.
- Dóša M., Holko L., Kostka Z., 2011, *Estimation of the mean transit times using isotopes and hydrograph recessions*, „Die Bodenkultur”, 62(1–4): 47–62.
- Gradziński M., Hercman H., Kicińska D., Barczyk G., Bella P., Holúbek P., 2009, *Kras tatrzański – rozwój wiedzy w ostatnich trzydziestu latach*, „Przeegląd Geologiczny”, 57(8): 674–684.
- Holko L., 1995a, *Snowmelt runoff generation in mountainous catchment*, „IAHS Publications”, 229: 231–236.
- Holko L., 1995b, *Stable environmental isotopes of ¹⁸O and ²H in hydrological research of mountainous catchment*, „Journal of Hydrology and Hydromechanics”, 43(4–5): 249–274.
- Holko L., Kostka Z., 2006, *Hydrologický výskum vo vysokohorskom povodí Jaloveckého potoka*, „Journal of Hydrology and Hydromechanics”, 54(2): 192–206.
- Holko L., Kostka Z., 2010, *Hydrological processes in mountains – knowledge gained in the Jalovecky Creek catchment, Slovakia*, „IAHS Publications”, 336: 84–89.
- Holko L., Kostka Z., Šanda M., 2011, *Assessment of frequency and areal extent of overland flow generation in a forested mountain catchment*, „Soil & Water Research”, 6(1): 43–53.
- Holko L., Danko M., Dóša M., Kostka Z., Šanda M., Pfister L., Ifly J. F., 2013, *Spatial and temporal variability of stable water isotopes in snow related hydrological processes*, „Die Bodenkultur”, 64(3–4): 39–45.
- Kendall C., McDonnell J. J. (red.), 1998, *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Amsterdam, Elsevier Science B.V.
- Kosiarz N., 2012, *Sezonowa zmienność składu izotopowego wód Wywierzyśka Olczyskiego*, praca magisterska, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH.
- Łajczak A., 1988, *Opady i odpływ w Polskich Tatrach w świetle pomiarów wieloletnich*, „Czasopismo Geograficzne”, 59: 137–170.
- Małecka D., 1996, *Hydrogeologiczna charakterystyka Tatr w świetle badań monitoringowych* [w:] Mirek Z., Głowaciński Z., Klimek K., Piękoś-Mirkowa H. (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego*, Zakopane–Kraków, Tatrzański Park Narodowy: 19–30.
- Małecka D., 1997, *Źródła masywu tatrzańskiego*, „Acta Universitatis Lodzianensis – Folia Geographica Physica”, 2: 9–26.
- Małecka D., Humnicki W., 1989, *Rola warunków hydrodynamicznych w kształtowaniu reżimu Wywierzyśka Olczyskiego*, „Przeegląd Geologiczny”, 37: 78–84.
- Małecka D., Nowicki Z., 2002, *Skład izotopowy wód podziemnych Tatr i Podhala*, „Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego”, 404: 67–84.
- Nowicki Z., Sołtyk W., 1973, *Badania stężenia trytu w otworze Zakopane IG-1. Dokumentacja*, Archiwum PH, Warszawa.
- Pociask-Karteczka J., Wójcik S., Żelazny M., 2010, *Hydrochemical evidences of hydraulic connection between crystalline and carbonate aquifers (the Tatra Mts., East-Central Europe)* [w:] Zuber A., Kania J., Kmiecik E. (red.), *XXXVIII IAH Congress – Groundwater Quality Sustainability. Extended Abstracts*, University of Silesia Press: 1279–1285.
- Róžański K., Duliński M., 1988, *A reconnaissance isotope study of waters in the karts of the Western Tatra Mountains*, „Catena”, 15: 289–301.

- Wachniew P., Kosiarz N., Pociask-Karteczka J., Baran A., Jelonkiewicz Ł., 2012, *Use of environmental isotopes and hydrochemistry in the study of a mountain karst system* [w:] *Congress Programme and Abstracts*, 39th International Association of Hydrogeologists Congress, September 16–21, 2012, Niagara Falls, Canada: 60.
- Wolanin A., Żelazny M., 2010, *Sezonowe zmiany chemizmu wód źródeł tatrzańskich w zlewniach Potoku Chochołowskiego i Potoku Kościeliskiego w 2009 roku* [w:] Ciupa T., Suligowski R. (red.), *Woda w badaniach geograficznych*, Kielce, Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego: 339–347.
- Wójcik S., 2012, *Zróźnicowanie i sezonowa zmienność chemizmu wybranych źródeł zlewni Potoku Olczyskiego w Tatrach*, „Prace Geograficzne”, 128: 61–75.
- Zuber A., Małecki J. J., Duliński M., 2008, *Groundwater ages and altitudes of recharge areas in the Polish Tatra Mts. as determined from ^3H , ^{18}O and ^2H data*, „Geological Quarterly”, 52(1): 71–80.
- Żelazny M., 2012, *Czasowo-przestrzenna zmienność cech fizykochemicznych wód Tatrzańskiego Parku Narodowego*, Kraków, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ.