

Sezonowa zmienność temperatur wód podziemnych drenowanych przez wybrane źródła w Karpatach wewnętrznych

Marzena Szostakiewicz-Hołownia¹

Seasonal variability of selected spring's water temperature in Inner Carpathians. *Prz. Geol.*, 63: 1085–1090.

Abstract. Studies of spring waters, especially in mountainous areas, where there are no well boreholes, provide valuable information on the dynamics and chemistry of groundwater. The results of one and a half year monitoring of five selected springs located in the Inner Carpathians were presented in the article. All the springs drain cool, slightly alkaline waters with a low mineralization, which classifies them into acratopegae. In the ionic composition of studied waters bicarbonates, calcium, and magnesium are dominated. In particular, attention was drawn to changes in temperature, since their analysis allowed a relative assessment of the depth of water circulation drained by the springs.

Keywords: springs, groundwater temperature, Inner Carpathians

W obszarach górskich, szczególnie objętych ochroną przyrody, źródła są często jedynymi punktami umożliwiającymi badanie wód podziemnych. Z tego względu monitorowanie wydajności i chemizmu wód przez nie drenowanych ma niezwykle istotne znaczenie w rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych występujących w danym terenie.

W artykule zaprezentowano wyniki półtorarocznych obserwacji pięciu wybranych źródeł zlokalizowanych w Karpatach wewnętrznych (ryc. 1). Szczególnie zwrócono uwagę na dynamikę zmian temperatur wód podziemnych, gdyż ten czynnik umożliwia względne oszacowanie głębokości ich krążenia.

Głównym kryterium wyboru źródeł była różna litologia drenowanych warstw wodonośnych. Przy wyborze brano również pod uwagę wyniki wcześniej prowadzonych badań (Małecki & Szostakiewicz, 2005; Szostakiewicz-Hołownia, 2010; Szostakiewicz-Hołownia, 2012a, b).

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH ŹRÓDEŁ

Dwa z wybranych źródeł są zlokalizowane w Tatrach w obrębie serii osadowych (B5 i B7), dwa w Pieninach (M2a i M7) oraz jedno (S6a) na Podhalu (ryc. 1).

Źródło B5 znajduje się w zlewni potoku Białego w Tatrach. Woda wypływa na rzędnej 1067 m n.p.m. na wschodnim stoku Zameczków. Pod względem tektoniczno-facjalnym miejsce wypływu jest usytuowane w jednostce regłowej dolnej. Natomiast pod względem litologicznym woda wypływa na kontakcie przykrytych zwietrzelinami mułowców ilastych z przewarstwieniami dolomitów oraz piaskowców kwarcowych z przewarstwieniami łupków triasu górnego (Guzik i in., 1955). Ze względu na rodzaj przewodów doprowadzających wodę źródło zostało zaliczone do szczelinowych.

Źródło B7, podobnie jak poprzednie, jest zlokalizowane w tatrzańskie zlewni potoku Białego. Znajduje się na południowym stoku Siwarowego Żlebu na rzędnej 995 m n.p.m. w obrębie jednostki regłowej dolnej. Woda wypływa z dolomitów bryłowych z przewarstwieniami

wapieni mikrytowych triasu środkowego (Guzik i in., 1955). Jest to źródło szczelinowe o stałym wypływie.

Szczelinowe źródło S6a znajduje się w południowym skrzydle niecki Podhala na stoku Wierchu Grapa w dolinie potoku Suchego. Woda wypływa na rzędnej 826 m n.p.m. z osadów fliszowych warstw chochołowskich dolnych, przykrytych zwietrzelinami (Piotrowska, 1999).

Źródło M2a jest zlokalizowane na rzędnej 684 m n.p.m. w obrębie pienińskiego pasa skałkowego w dolinie potoku Macelowego. Woda wypływa ze szczeliny w wapieniach płaszczowiny pienińskiej (Birkenmajer, 2002–2005).

Drugie ze źródeł pienińskich również znajduje się w zlewni potoku Macelowego. Rzędna wypływu wód podziemnych na powierzchnię terenu jest równa 639 m n.p.m. W miejscu wypływu stwierdzono występowanie przykrytych zwietrzelinami utworów fliszowych formacji sromowieckiej (płaszczowina pienińska) (Birkenmajer, 2002–2005).

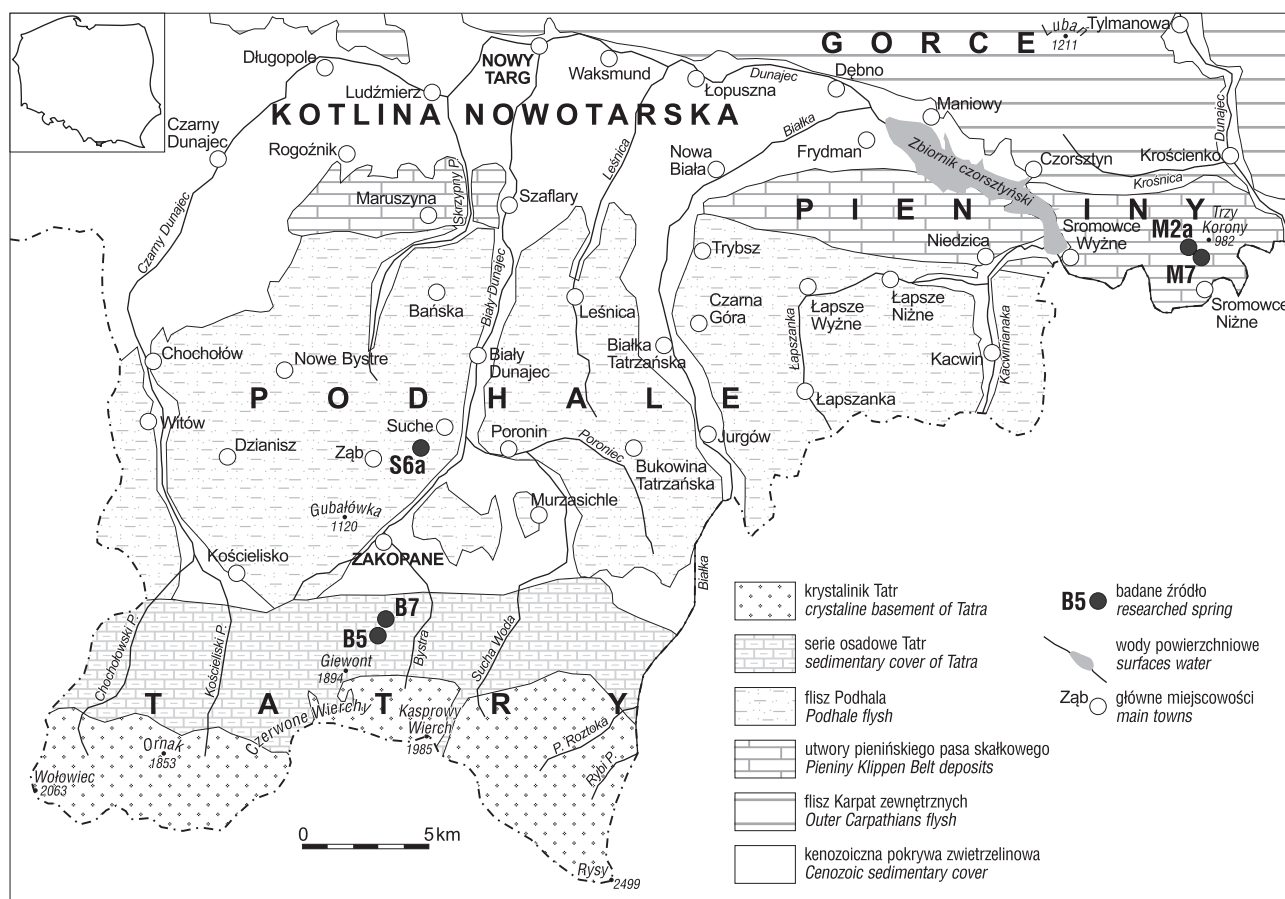
Wszystkie badane źródła cechuje stały charakter wypływu oraz stokowa pozycja morfologiczna (Małecki & Szostakiewicz, 2005; Szostakiewicz-Hołownia, 2010; Szostakiewicz-Hołownia, 2012a, b).

METODYKA BADAŃ

W artykule zaprezentowano wyniki badań monitoringowych prowadzonych w latach 2013–2014. Obserwowano zmiany wydajności oraz chemizmu wód drenowanych przez pięć źródeł. Co kwartał oznaczano podstawowe właściwości fizykochemiczne wód podziemnych (temperaturę, odczyn, przewodność elektrolityczną właściwą, potencjał red-ox) oraz pobierano próbki do analiz laboratoryjnych obejmujących oznaczenia makroskładników wód oraz wybranych mikroskładników (Fe, Mn, Al, Si).

W celu zapewnienia porównywalności wyników, terenowe badania właściwości fizykochemicznych wód były w każdym przypadku wykonywane za pomocą tego samego sprzętu, przez tę samą osobę, z zastosowaniem tej samej metodyki. Metodyka poboru próbek wód do analiz laboratoryjnych oraz sposób oznaczania zawartości poszczegól-

¹ Zakład Hydrogeologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; marzena.szostakiewicz@uw.edu.pl.



Ryc. 1. Lokalizacja badanych źródeł (na podstawie Małeckiej, 2003)
 Fig. 1. Location of researched springs (according to Małecka, 2003)

nych składników były takie same. Wszystkie analizy wykonywano w jednym laboratorium.

W kwietniu 2013 r. we wszystkich niszach źródłanych zamontowano DIVERY umożliwiające monitoring zarówno stanów wody, jak i jej temperatury. Pomiary były wykonywane w interwałach 30-minutowych, co umożliwiło określenie zarówno sezonowych, jak i dobowych wahań temperatur. W przypadku każdego ze źródeł w ciągu jednego roku pozyskano i przeanalizowano 17 520 pomiarów stanów wody oraz tyle samo pomiarów temperatury wody.

Co kwartał wykonywano również pomiary wydajności źródeł metodą bezpośrednią. Wyniki pomiarów wydajności źródeł i stanów wody posłużą do wykonania krzywych konsumpcyjnych umożliwiających obliczenie wydajności źródła na podstawie zarejestrowanego przez DIVER stanu wody.

ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

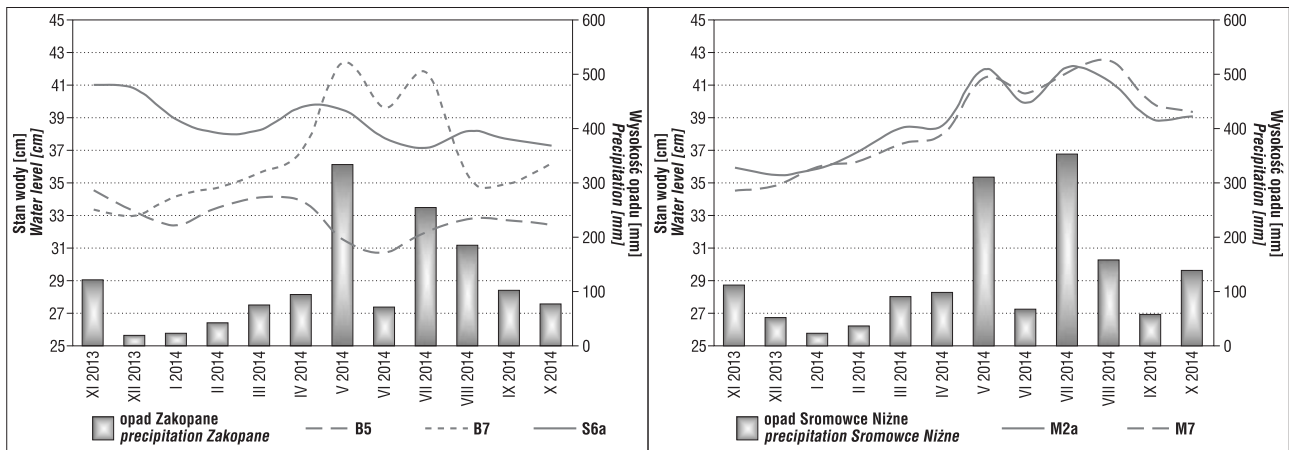
Wydajności większości badanych źródeł były niewielkie. Źródła pienińskie (M2a i M7) oraz zlokalizowane w Tatrach źródło B5 można zaliczyć do VI klasy Meinzera. Drugie źródło tatrzańskie (B7) charakteryzowało się zdecydowanie większą wydajnością, pozwalającą zaliczyć je do V klasy. Natomiast wydajność źródła położonego na Podhalu (S6a) była najmniejsza i zostało ono zaliczone do VII klasy Meinzera.

Analizując zmiany średnich miesięcznych stanów wody w niszach źródeł podhalańskiego (S6a) i tatrzańskiego

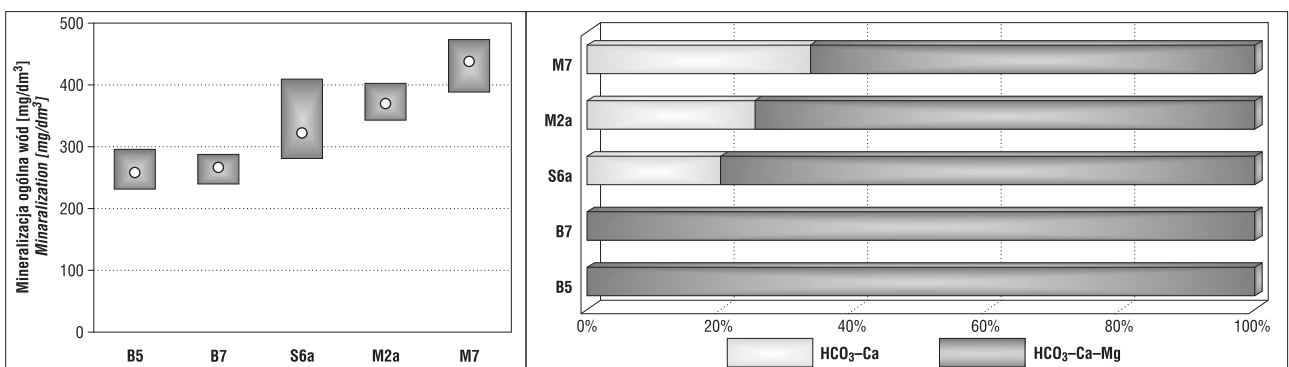
(B5), w ciągu roku zaobserwowano dwie wyraźne kulminacje, z których jedną można wiązać z zasilaniem roztopowym, drugą zaś z alimentacją wód opadowych. Z tego względu reżim tych źródeł określono jako roztopowo-opadowy (ryc. 2). Natomiast w źródłach pienińskich (M2a i M7) oraz w jednym ze źródeł tatrzańskich (B7) w roku 2014 zaznaczyła się wyraźna reakcja na opady atmosferyczne, natomiast wzrost wydajności w czasie roztopów był niewielki, co pozwala stwierdzić, że w tym okresie źródła charakteryzowały się głównie reżimem opadowym (ryc. 2). Wyniki wcześniejszego monitoringu wydajności prowadzonego w punkcie M7 przez Humnickiego (2007) wskazują na zmienny charakter reżimu i okresowo znaczącą rolę wód roztopowych w zasilaniu tego źródła.

Wszystkie badane źródła drenowały wody słabo zaszadowe, o niewielkiej mineralizacji, pozwalającej zaliczyć je do akrotopogów (Pazdro & Kozerski, 1990). Wody tatrzańskie charakteryzowały się zdecydowanie mniejszą mineralizacją od wód opróbowywanych na terenie Podhala i Pienin, co może być spowodowane różnicami w litologii wodonośca oraz w czasie przebywania wody w systemie wodonośnym (ryc. 3).

W składzie jonowym wszystkich badanych wód źródłanych dominują wapń, magnez oraz wodorowęglany, co ma swoje odzwierciedlenie w typach hydrochemicznych wód. W Tatrach stwierdzono występowanie jedynie wód typu $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, co jest związane z litologią utworów dominujących w zlewni potoku Białego – dolomitów. W pozostałych źródłach przeważały wody typu



Ryc. 2. Sezonowe zmiany stanów wód podziemnych
Fig. 2. Seasonal variability of groundwater levels



Ryc. 3. Maksymalne, minimalne i średnie wartości mineralizacji wód podziemnych oraz dominujące typy drenowanych wód
Fig. 3. Maximum, minimum and average values of groundwaters' mineralization and dominant chemical types of ground water

HCO₃-Ca-Mg, lecz podrzędnie stwierdzono również występowanie wód dwujonowych typu HCO₃-Ca (ryc. 3).

Niezwykle cennych informacji odnośnie reżimu badanych źródeł dostarczyły obserwacje zmian temperatur wód podziemnych przez nie drenowanych. Na tle wszystkich badanych punktów zdecydowanie wyróżnia się tatrzańskie źródło (B7). Charakteryzowało się ono prawie stabilną w ciągu całego okresu badawczego temperaturą wynoszącą średnio 5,7°C. W pozostałych źródłach stwierdzono wyraźne sezonowe zmiany temperatury wód podziemnych (ryc. 4). Natomiast w żadnym ze źródeł nie zarejestrowano dobowych wahań temperatur wód, zależnych od dobowych zmian temperatury powietrza.

Warto dodać, że najwyższe temperatury zarówno wód podziemnych, jak i powietrza zanotowano w sierpniu 2013 i 2014 r. Natomiast w przypadku najniższych temperatur zaobserwowano prawie miesięczne opóźnienie w reakcji wód podziemnych w stosunku do temperatur powietrza (ryc. 4).

Wyniki monitoringu zmian temperatur wód podziemnych mogą być wykorzystane do oceny głębokości ich krążenia, ponieważ wraz ze wzrostem głębokości występowania wód obserwuje się zanik dobowych wahań temperatur, potem sezonowych i najgłębiej rocznych. Ponadto wraz ze wzrostem głębokości krążenia wód amplitudy sezonowych i rocznych zmian temperatury zmniejszają się (Pazdro & Kozerski, 1990).

Analizując wartości tych amplitud badanych wód podziemnych, można stwierdzić, że wody najgłębszego krążenia są drenowane przez tatrzańskie źródło B7 (roczna amplituda wynosiła 0,3°C), natomiast najpłytszego – przez źródło pienińskie M2a z roczną amplitudą (5,3°C), zaś głębokości krążenia źródeł B5 i S6a są do siebie zbliżone (tab. 1 i 2).

Oszacowanie głębokości krążenia wód podziemnych umożliwia klasyczny wzór przytoczony za Pazdrą i Kozerskim (1990), zakładając, że przy wypływie wody na powierzchnię terenu nie dochodzi do zmiany jej temperatury:

$$H = g \cdot [T - (t_{sr} + A)] + h$$

gdzie:

H – głębokość występowania wody [m],

g – stopień geotermiczny [m],

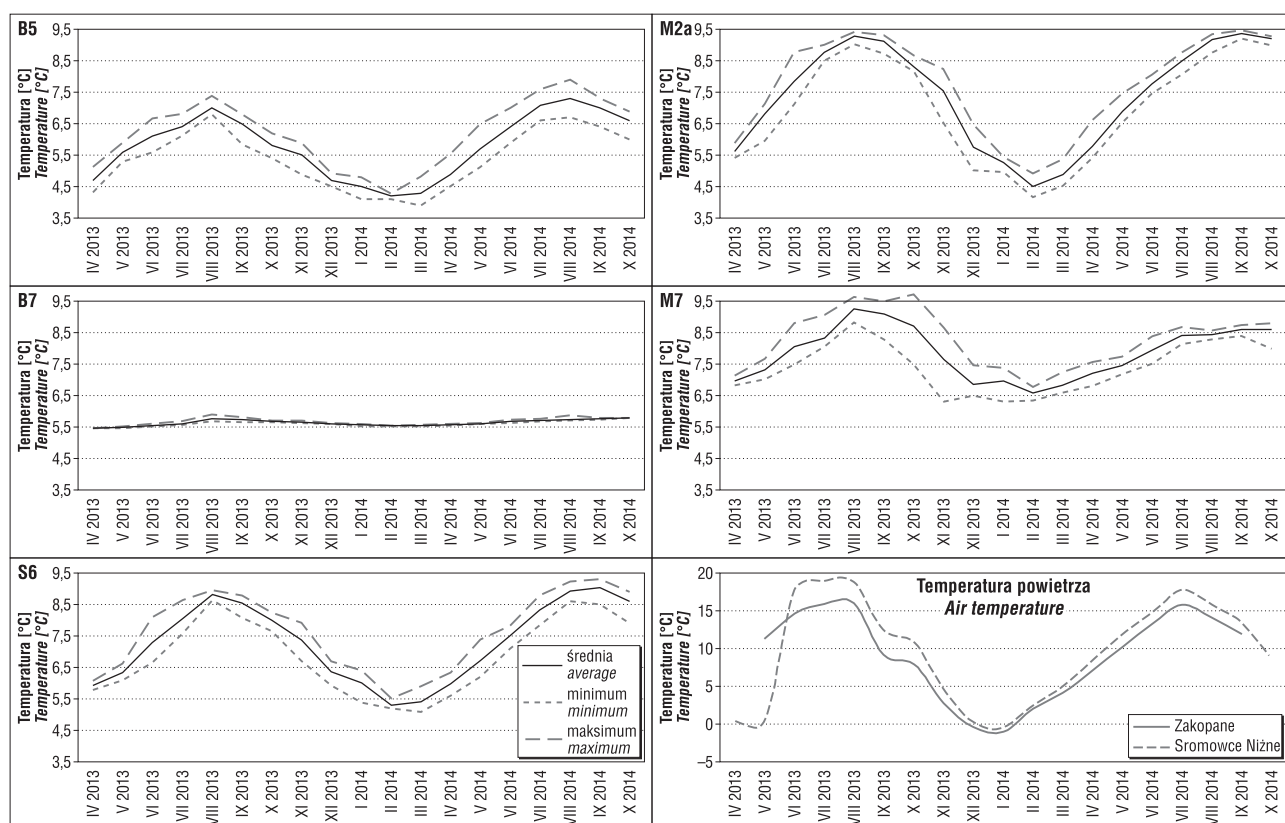
T – temperatura wody na głębokości H [°C],

t_{sr} – średnia roczna temperatura powietrza w danej miejscowości [°C],

A – dodatek zależny od wysokości nad poziomem morza [°C],

h – głębokość strefy stałych temperatur [m].

Dla źródeł położonych na Podhalu i w Tatrach do obliczeń przyjęto wyniki pomiarów temperatury powietrza pomierzonych na stacji w Zakopanym (www7.ncdc.noaa.gov). Dla źródeł pienińskich przyjęto średnią roczną temperaturę



Ryc. 4. Maksymalne, minimalne i średnie miesięczne temperatury wód podziemnych
 Fig. 4. Maximum, minimum and average monthly temperatures of groundwaters

Tab. 1. Miesięczne amplitudy temperatur wód podziemnych [°C]
 Table 1. Monthly amplitudes of groundwaters' temperature [°C]

Miesiąc Month	Numer źródła Spring number				
	B5	B7	S6a	M2a	M7
IV 2013	0,8	0,0	0,3	0,5	0,3
V 2013	0,6	0,0	0,5	1,2	0,6
VI 2013	1,2	0,1	1,4	1,7	1,3
VII 2013	0,7	0,1	1,1	0,5	1,1
VIII 2013	0,6	0,2	0,3	0,4	0,8
IX 2013	1,0	0,2	0,7	0,6	1,2
X 2013	0,9	0,1	0,6	0,5	2,3
XI 2013	1,0	0,1	1,3	1,8	2,3
XII 2013	0,4	0,0	0,8	1,4	1,0
I 2014	0,7	0,1	1,0	0,5	1,1
II 2014	0,2	0,0	0,3	0,8	0,4
III 2014	0,8	0,0	0,8	0,9	0,7
IV 2014	1,1	0,0	0,8	1,2	0,8
V 2014	1,5	0,0	1,2	1,0	0,5
VI 2014	1,1	0,1	0,7	0,6	0,9
VII 2014	1,0	0,1	1,0	0,7	0,5
VIII 2014	1,2	0,2	0,6	0,6	0,3
IX 2014	1,0	0,1	0,8	0,3	0,3
X 2014	0,9	0,0	0,9	0,3	0,8

Tab. 2. Podstawowe wartości statystyczne temperatur wód podziemnych badanych źródeł w 2014 roku hydrologicznym (n = 17520)
Table 2. Basic statistical values of groundwaters' temperature (2014 hydrological year) (n = 17520)

Parametr statystyczny <i>Statistical parameter</i>	Numer źródła <i>Spring number</i>				
	B5	B7	S6a	M2a	M7
Maksimum [°C] <i>Maximum</i>	7,9	5,9	9,3	9,5	8,8
Minimum [°C] <i>Minimum</i>	3,9	5,5	5,1	4,2	6,3
Średnia [°C] <i>Average</i>	5,68	5,65	7,12	7,03	7,62
Mediana [°C] <i>Median</i>	5,5	5,6	7,1	7,1	7,5
Amplituda roczna [°C] <i>Annual amplitude</i>	4,0	0,3	4,2	5,3	2,5
Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>	1,2	0,1	1,3	1,7	0,8

Tab. 3. Szacunkowa głębokość krążenia wód podziemnych
Table 3. The estimated depth of groundwater circulation

Numer źródła <i>Spring number</i>	t [°C]	T [°C]	A [°C]	g [m]	h [m]	H [m]
B5	6,1	5,8	1,4	43,5–52,6	18	56–71
B7	6,5	5,7	1,3	43,5–52,6	18	75–94
S6a	7,4	7,1	1,2	43,5–52,6	18	45–58
M2a	7,8	7,1	1,1	43,5–52,6	18	59–76
M7	8,0	7,6	1,1	43,5–52,6	18	43–56

T – temperatura wody na głębokości H; t – średnia roczna temperatura powietrza w danej miejscowości; A – dodatek zależny od wysokości nad poziom morza; g – stopień geotermiczny; h – głębokość strefy stałych temperatur; H – głębokość występowania wody.

T – water temperature on H depth; *t* – average annual air temperature; *A* – parameter was depended on elevation above sea level; *g* – geothermal degree; *h* – depth of constant temperatures zone; *H* – water table depth.

powietrza pomierzoną na stacji w Sromowcach Niżnych. W górach średnia roczna temperatura powietrza maleje wraz ze wzrostem wyniesienia terenu nad poziom morza. Z tego względu w obliczeniach uwzględniono gradient temperaturowy wynoszący w Tatrach 0,55°C/100 m, na południowych stokach Pienin 0,35°C/100 m i 0,26°C/100 m na Podhalu (Orlicz, 1962; Kostrakiewicz, 1982). Wartości *h* i *A* przyjęto za Pazdrą & Kozerskim (1990). Stopień geotermiczny w regionie podhalańskim zawiera się w przedziale od 43,5 do 52,6m/1°C (Sroka, 1991; Plewa, 1994; Kępińska, 2001).

W Tatrach i na Podhalu uzyskane zależności pomiędzy obliczonymi głębokościami występowania wód są zgodne ze wcześniej przeprowadzoną analizą, bazującą na wartościach amplitud temperatur wód podziemnych (tab. 2 i 3). Wody podziemne drenowane przez źródło B7 występują najgłębiej, natomiast w pozostałych źródłach (B5 i S6a) wypływają wody płytszego krążenia (tab. 3). Natomiast w przypadku źródeł pienięskich obie metody wykazały odwrotną zależność (tab. 2 i 3). Wyjaśnienie tego zjawiska ułatwią wyniki aktualnie prowadzonych badań izotopowych.

Obliczone głębokości występowania wody zawierają się w przedziale od 43 do 94 m p.p.t. (tab. 3). Badania pro-

wadzone przez Chowańca (2009) wykazały, że dolna granica występowania spękań umożliwiających aktywną wymianę wód podziemnych na terenie Podhala znajduje się na głębokości 80–100 m. Na obszarze Pienin natomiast głębokość występowania tej granicy zmienia się od 10 m w obszarach zbudowanych z margli globotruncanowych do ponad 100 m w wapieniach (Michalik, 1963; Malinowski, 1991). W przypadku wszystkich źródeł obliczone głębokości występowania wód podziemnych mieszczą się w granicach strefy aktywnej wymiany. Należy jednak podkreślić, że wykonane obliczenia są wybitnie szacunkowe ze względu na specyfikę górskich systemów krążenia wód podziemnych.

PODSUMOWANIE

W obszarach górskich badania wód podziemnych, zwłaszcza monitoringowe, mają niezwykle istotne znaczenie w rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych. Szczegółowa analiza zmian temperatur wód drenowanych przez pięć wybranych źródeł umożliwiła względne oszacowanie głębokości ich krążenia. Zdecydowanie najgłębiej występują wody drenowane przez źródło tatrzańskie B7, o największej spośród badanych obiektów wydajności.

Natomiast wody obserwowane w pienińskim źródle M2a potencjalnie krążą najpłycej. Pod względem chemicznym wody drenowane przez źródła zlokalizowane w Tatrach charakteryzują się mniejszą niż pozostałe mineralizacją oraz większym udziałem w składzie jonowym magnezu, co ma swoje odzwierciedlenie w typie wody $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$. W wodach z Podhala i Pienin stwierdzono oprócz wód wodorowęglanowo-wapniowo-magnezowych również występowanie wód typu $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Prezentowane badania są kontynuowane, co pozwoli na precyzyjniejsze określenie reżimu badanych źródeł w dłuższym okresie czasowym.

Pracę zrealizowano w ramach projektu NCN nr 2011/03/D/ST10/05382.

LITERATURA

- BIRKENMAJER K. 2002–2005 – Pieniński Park Narodowy. Mapa geologiczna zakryta. Skala 1 : 5000 (Biblioteka Pienińskiego Parku Narodowego).
- CHOWANIEC J. 2009 – Studium hydrogeologii zachodniej części Karpat polskich. Biul. Państw. Inst. Geol., 434: 1–98.
- GUZIK K., GUZIK S., JACZYŃSKA W. & SOKOŁOWKI S. 1955 – Mapa geologiczna Tatr w skali 1 : 10 000 – arkusz Łysanki. Wyd. Geol., Warszawa.
- HUMNICKI W. 2007 – Hydrogeologia Pienin. Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- KĘPIŃSKA B. 2001 – Warunki geotermalne i termiczne podhalańskiego systemu geotermalnego w rejonie otworu Biały Dunajec PAN-1. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków. Stud., Rozpr., Monogr., 93.
- KOSTARAKIEWICZ L. 1982 – Klimat. [W:] Zarzycki (red.), Przyroda Pienin w obliczu zmian. Wyd. Nauk. PWN, 30: 53–69.
- MALINOWSKI J. (red.) 1991 – Budowa geologiczna Polski. Hydrogeologia (t.VII). Wyd. Geol., Warszawa.
- MAŁECKA D. 2003 – The thermal waters of Podhale, southern Poland: history of research, genesis and utility. Geol. Quart. 47 (2): 195–210.
- MAŁECKI J.J. & SZOSTAKIEWICZ M. 2005 – Czynniki kształtujące chemizm wód podziemnych zlewni potoku Suchego (flisz Podhala). Prz. Geol., 53: 1078–1078.
- MICHALIK A. 1963 – Budowle hydrotechniczne w Pieninach. Prz. Geol., 11: 323–324.
- ORLICZ M. 1962 – Klimat Tatr. [W:] Szafer W. (red.), Tatrzański Park Narodowy. Kraków.
- PAZDRO Z. & KOZERSKI B. 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- PIOTROWSKA K. 1999 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000 – arkusz Tatr Zachodnie. Wyd. Geol., Warszawa.
- PLEWA S. 1994 – Parametry geotermalne na obszarze Polski. Wyd. Centrum Podstawowych Problemów Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polska Akademia Nauk, Kraków.
- SROKA Z. 1991 – Nowe oznaczenie gęstości powierzchniowego strumienia ciepłego Ziemi w polskiej części Karpat. Zeszyty Naukowe AGH, Geofizyka Stosowana, 8. Kraków.
- SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA M. 2010 – Hydrochemiczna charakterystyka wód powierzchniowych i podziemnych zlewni potoku Białego (Tatry Zachodnie). Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Komisja Hydrologiczna PTG, 6: 53–63.
- SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA M. 2012a – Identyfikacja procesów kształtujących chemizm wód podziemnych zlewni potoku Białego (Tatry Zachodnie) z wykorzystaniem modeli geochemicznych. Biul. Państw. Inst. Geol., 451: 219–226.
- SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA M. 2012b – Chemizm wód źródłanych zlewni Potoku Macelowego w Pieninach. Pieniny – przyroda i człowiek, 12: 31–39.