

## ZMIENNOŚĆ SKŁADU IZOTOPOWEGO WÓD PODZIEMNYCH REJONU KRYNICY-ZDROJU I MUSZYNY W WARUNKACH ICH EKSPLOATACJI

### CHANGES OF GROUNDWATER ISOTOPIC COMPOSITION IN KRYNICA-ZDRÓJ AND MUSZYNA DISTRICT IN THE CONDITIONS OF THEIR VARIABLE EXPLOITATION

ZBIGNIEW NOWICKI<sup>1</sup>, AGNIESZKA FELTER<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Zasoby oraz skład chemiczny leczniczych szczaw rejonu Krynicy-Zdroju i Muszyny są formowane na drodze mieszania wód regionalnego i lokalnego systemu krążenia. W latach 2009–2012 dla wybranych ujęć tych wód wykonano nowe oznaczenia składu izotopowego. Wyniki badań przedstawione w artykule świadczą o wysokiej wrażliwości systemu wodonośnego m.in. na zmienne warunki eksploatacji, zostały też przeanalizowane wraz z danymi archiwalnymi w celu oceny zjawisk wpływających na zmienność składu izotopowego wód w czasie.

**Słowa kluczowe:** tryt, izotopy stabilne tlenu i wodoru, wody podziemne, eksploatacja wód.

**Abstract.** Resources and chemical composition of carbonated water in area of Krynica-Zdrój and Muszyna are formed by mixing water of local and regional flow system. The results of the water isotopic composition analysis from the years 2009–2012 made for some spring and wells, bring new information on such sensitivity of aquifer system to such factors as changing withdrawal. They were interpreted together with the archive data in order to evaluate the phenomena affecting the changeability of the isotopic composition of water in time.

**Key words:** tritium, oxygen and hydrogen stable isotopes, groundwater, water exploitation.

## WSTĘP

Wody podziemne w rejonie Krynicy-Zdroju i Muszyny występują w osadach czwartorzędowych oraz w przedczwartorzędowych utworach fliszowych. Pokrywy czwartorzędowe, ze względu na swoją stosunkowo niewielką miąższość, nie stanowią zasobnych kolektorów wody. Poziom czwartorzędowy, w którym zwierciadło wód podziemnych z reguły ma charakter swobodny, jest zasilany bezpośrednio przez opady atmosferyczne oraz w wyniku spływu wód ze zboczy. Czas obiegu wód jest bardzo krótki i dla wielu obszarów rejonu – krótszy niż rok. W obrębie utworów fliszowych występują głównie wody szczelinowe, ale ze

względem na zmniejszanie się szczelinowatości wraz z głębokością, miąższość strefy zawodnionej nie jest zbyt duża. Istotną, hydrogeologiczną cechą tego obszaru (jak i całych Karpat), jest występowanie nieciągłych, oddzielonych od siebie hydrostruktur, o bardzo zmiennym stopniu zawodnienia. Przyczyną takiego stanu jest głównie tektonika fałdowa.

W ogólnym schemacie zasilania i przepływu wód podziemnych, rozumianym jako model pojęciowy lub koncepcyjny (conceptual model), przyjmuje się istnienie dwóch systemów krążenia (Kania i in., 2009). Pierwszy z nich to system lokalny, który dotyczy głównie przepływów wód

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: zbigniew.nowicki@pgi.gov.pl, agnieszka.felter@pgi.gov.pl

zwykłych, natomiast drugi to system regionalny, w obrębie którego następuje przepływ wód mineralnych. Obydwa systemy w pewnych strefach nawzajem się przenikają i nie tworzą ostrych granic. Przyczyną tego stanu jest występowanie wielu czynników środowiskowych, z których najistotniejszymi są: strefowa obecność utworów słabo przepuszczalnych, zmienna wielkość dopływu endogenicznego dwutlenku węgla oraz występowanie stref dyslokacyjnych będących, w zależności od ich charakteru, strefami o zwiększonej przewodności lub wodoszczelnymi barierami.

Złożoność warunków hydrogeologicznych odzwierciedla zróżnicowanie mineralizacji i składu chemicznego wód podziemnych, w szczególności występujących tu szczaw. Poza typowym wzrostem mineralizacji oraz zmianą składu wód wraz z głębokością, jest obserwowana również lateralna zmienność (strefowość) mineralizacji i składu chemicznego, wynikająca z występowania wspomnianych barier hydrodynamicznych oraz uprzywilejowanych stref dopływu.

Większość ujęć wód leczniczych, zlokalizowanych w obydwu regionach, posiada wyniki oznaczeń trytu oraz izotopów stabilnych tlenu i wodoru. Zbiory wyników dla niektórych ujęć obejmują do kilkunastu oznaczeń, pochodzących z ostatnich 30–40 lat. Ocena dynamiki przemian hydrochemicznych wód podziemnych, uwzględniająca wcześniejsze wyniki oznaczeń izotopowych, pozwoliła na sformułowanie

wniosek dotyczących związków mineralizacji i proporcji pomiędzy głównymi jonami a wiekiem wód (Chowaniec i in., 2009). Stopień skomplikowania warunków hydrogeologicznych w tym rejonie oraz zmienność wielkości eksploatacji w czasie sprawiają, że prowadzenie badań izotopowych w sposób ciągły jest niezbędne do właściwej interpretacji danych hydrochemicznych i hydrodynamicznych.

Najnowsze badania izotopowe wód Krynicy-Zdroju i Muszyny pochodzą z lat 2009–2012 (Felter i in., 2013). Zostały wykonane w ramach przedsięwzięcia pn. Prowadzenie Banku Danych Wód Podziemnych Zaliczonych do Kopalni, realizowanego przez PIG-PIB na zlecenie Ministra Środowiska i finansowanego przez NFOŚiGW. W ramach prac wykonano oznaczenia trytu oraz składu izotopów stabilnych tlenu i wodoru wód występujących m.in. w wybranych ujęciach wód leczniczych Doliny Popradu. Interpretację własnych i wcześniejszych danych izotopowych przeprowadzono na podstawie założenia przyjętego dla modeli hydrodynamicznych i pojęciowych. Wiek wód podziemnych został określony na podstawie dopasowania krzywych (przypadek znacznikowy) opisujących funkcję wejścia (zmienność trytu w opadach w Krakowie) i funkcję końcową (obserwowaną) przy zmiennych udziałach poszczególnych typów wód w ogólnej mieszaninie (kolejne iteracje aż do uzyskania najlepszego dopasowania).

## REJON KRYNICY-ZDROJU

Uzdrowisko jest położone w obrębie jednostki magurskiej Karpat fliszowych, na pograniczu dwóch stref tektoniczno-facjalnych – sądeckiej i krynickiej, oddzielonych od siebie tzw. dyslokacją krynicką, poprzecinaną licznymi uskokiemi poprzecznymi o przebiegu NE–SW, m.in. uskokiemi Góry Parkowej oraz Słotwin. Lecznicze szczawy, ujęte w źródłach i otworach, występują na różnych głębokościach w utworach eocenu. Zasilanie regionalnego systemu wodonośnego zachodzi na obszarze położonym na wschód od doliny potoku Kryniczanka, będącej strefą drenażu.

W Krynicy-Zdroju badania izotopowe prowadzono w 4 źródłach oraz w 2 otworach ujmujących lecznicze szczawy o mineralizacji od 820 do 4300 mg/dm<sup>3</sup>. Badania trytowe pozwoliły na określenie procentowych udziałów wód współczesnych (zawierających tryt) i wód z przepływów regionalnych (beztrytowych) w poszczególnych wypływach. Na figurze 1 przedstawiono wyniki zmian zawartości trytu w czasie, w źródłach Jan A i Słotwinka, reprezentujących naturalne wypływy niewymuszone eksploatacją oraz otworach Jan 13A oraz Mieczysław, gdzie w trakcie eksploatacji ma miejsce wymuszony dopływ wód.

Na figurze 1A (źródła Jan A) jest bardzo wyraźnie widoczny fragment krzywej przejścia trytu odpowiadający pikowi trytowemu w opadach z lat 1962–1963. Najlepsze dopasowanie krzywych uzyskano przy udziale wód współczesnych, wynoszącym 90%. Wiek tych wód (trytowych) określono na 13–14 lat. Wydajność źródła odznacza się dużą

zmiennością naturalną, na którą mogą nakładać się czynniki antropogeniczne. W ciągu ostatnich 5 lat wahała się ona w zakresie od 0,15 do 0,35 m<sup>3</sup>/h.

Zbliżony obraz krzywej trytowej uzyskano w przypadku źródła Słotwinka (fig. 1B). W tym przypadku udział wód współczesnych (trytowych) wynosił ok. 25–35%, natomiast wiek wód oszacowano na 8–12 lat. Potwierdzeniem znacznie mniejszego udziału wód współczesnych w zasilaniu źródła Słotwinka, w porównaniu ze źródłem Jan A, jest zdecydowanie wyższa mineralizacja wynosząca około 3950 mg/dm<sup>3</sup> (przy 820 mg/dm<sup>3</sup> w źródle Jan A). W ocenie autorów wynika to z wyraźnie gorszych warunków infiltracyjnych w obszarze bezpośredniego zasilania źródła. Wskazuje na to również mniejszy zakres wahań jego wydajności, który dla okresu 2007–2012 mieścił się w granicach 0,40–0,65 m<sup>3</sup>/h, przy średniej nieco poniżej 0,50 m<sup>3</sup>/h.

Udział wód współczesnych (trytowych) i to na poziomie 50–70% stwierdzono w otworze eksploatacyjnym Mieczysław, ujmującym poziom wodonośny na głębokości 51,1–56,6 m. Jest on eksploatowany stale ze średnią wydajnością 0,18–0,19 m<sup>3</sup>/h. Zmiany stężeń trytu w czasie przedstawiono na figurze 1C. Wiek wód w składowej współczesnej wynosi tu 8–10 lat.

W przypadku wód pochodzących z otworów, udział wód współczesnych jest zmienny i pozostaje w bardzo silnym związku bezpośrednim z wielkością i reżimem eksploatacji. Doskonałym przykładem występowania tego rodzaju zale-

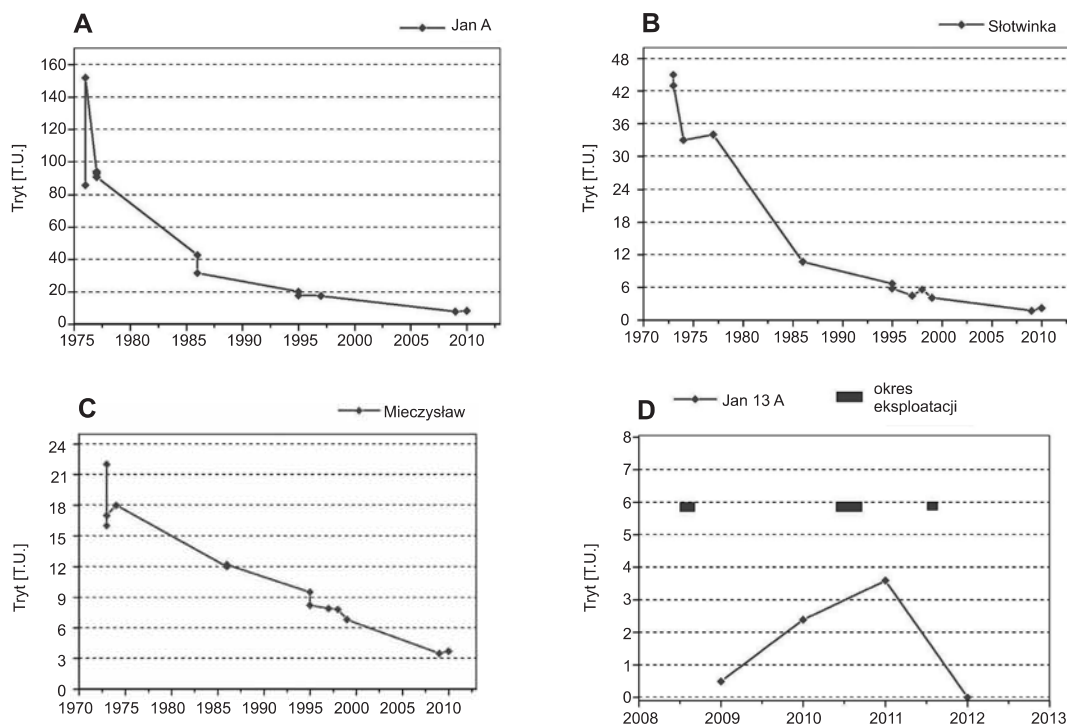


Fig. 1. Zmiany zawartości trytu w wodach leczniczych wybranych ujęć Krynicy-Zdroju

A – źródło Jan A; B – źródło Słotwinka; C – otwór Mieczysław; D – otwór Jan 13a

na podstawie danych archiwalnych w Ciężkowski i in. 1999. Referencje: dane z lat 1973–1974 – Dowgiałło (niepublikowane – za Ciężkowski i in., 1999); 1977 r. – WFiTJ AGH; 1986 r. – WFiTJ AGH (Jan A); 1986 r. – Uzdrowisko Krynica; 1995 r. – Ciężkowski i in. (1996); 1997–1999 – Ciężkowski i in. (1999)

Changes in tritium concentration in therapeutic waters from selected groundwater intakes of Krynica-Zdrój

A – Jan A spring; B – Słotwinka spring; C – Mieczysław well; D – Jan 13a well

based on archive data contained in Ciężkowski *et al.*, 1999. References: data from the years 1973 to 1974 – Dowgiałło (unpublished – after Ciężkowski i in., 1999); 1977 – WFiTJ AGH; 1986 – WFiTJ AGH (Jan A spring); 1986 – Spa Krynica; 1995 – Ciężkowski *et al.* (1996), 1997 to 1999 – Ciężkowski *et al.* (1999)

żności jest otwór Jan 13a (fig. 1D), położony na zboczu Góry Parkowej, ujmujący szczawy o mineralizacji około  $1400 \text{ mg/dm}^3$  na głębokości 45,5–50,0 m.

Przed 2010 rokiem wody w tym otworze nie zawierały trytu, nie były również eksploatowane w sposób ciągły od ponad 2 lat. Krótkotrwałe okresy uruchomienia wydobywania wód, z niedużym w stosunku do zasobów eksploatacyjnych wydatkiem, które miały miejsce od maja do sierpnia 2010 r., spowodowały niemal natychmiastowy dopływ wód współczesnych, w wyniku czego dwa miesiące później zawartość w nich trytu wynosiła niemal 2,5 T.U. Podobna sytuacja miała miejsce w 2011 r. Po zaprzestaniu eksploatacji zawartość trytu w wodzie wróciła do stanu wyjściowego i wynosiła 0 T.U.

Oznaczenia składu izotopowego tlenu i wodoru w rejonie Krynicy-Zdroju wykazały, że zmienność ich wartości jest stosunkowo niewielka i wynosi:

- wody ze źródeł:  $\delta^{18}\text{O}$  od  $-11,2\text{‰}$  do  $-10,2\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  od  $-78\text{‰}$  do  $-71\text{‰}$ ;
- wody z otworów eksploatacyjnych:  $\delta^{18}\text{O}$  od  $-10,8\text{‰}$  do  $-10,4\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  od  $-78\text{‰}$  do  $-73\text{‰}$ .

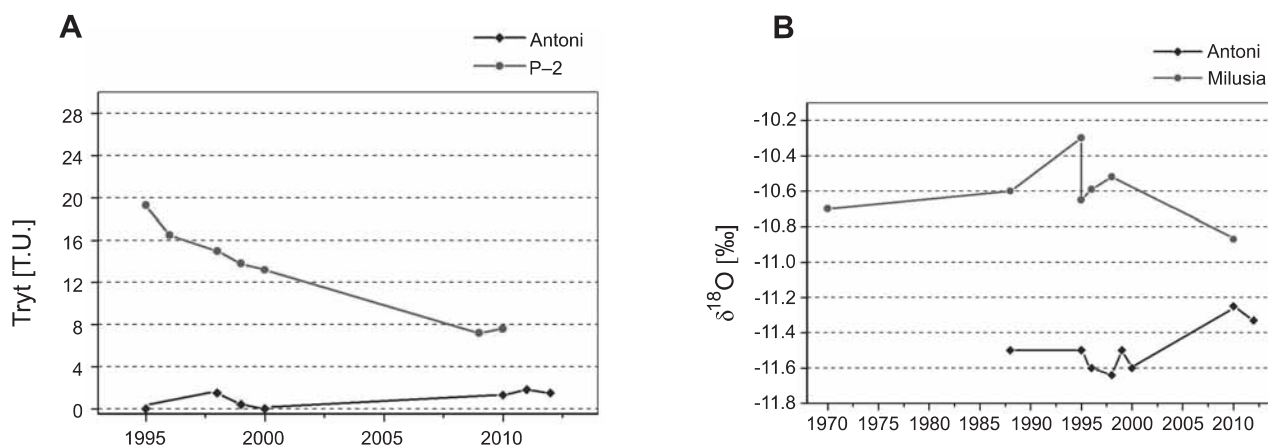
Przedziały zmienności delt tlenowych i deuterowych w źródłach, o 90% udziale wód współczesnych (trytowych), wynoszą:  $\delta^{18}\text{O}$  od  $-11,0\text{‰}$  do  $-10,2\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  od  $-76\text{‰}$  do  $-72\text{‰}$  przy wartościach średnich:  $\delta^{18}\text{O} = -10,6\text{‰}$ ;  $\delta\text{D} = -74\text{‰}$ .

Autorzy przyjmują, że charakteryzują one średni, roczny skład izotopów stabilnych w wodach infiltrujących na tym terenie.

## REJON MUSZYNY

Miejscowość jest położona w obrębie jednostki magurskiej Karpat fliszowych, w krynickiej strefie tektoniczno-facjalnej zbudowanej z utworów, które podlegały sedymenta-

cji od kredy górnej (turon) po eocen i reprezentowanych przez piaskowce i łupki. Występowanie wód leczniczych jest związane z uskokiem Muszyny, biegnącym wzdłuż do-



**Fig. 2.** Zmiany zawartości trytu (A) oraz składu izotopowego (B) w wodach leczniczych wybranych ujęć Muszyny

na podstawie danych archiwalnych z Porwisz i in. (2002). Referencje: dane z 1970 r. – Dowgiałło (1973); 1973 r. – Dowgiałło (niepublikowane – za Ciężkowski i in., 1999); 1988 r. – WFiTJ (prace własne); 1995 – Ciężkowski i in. (1996); 1996 – Poprawski in. (1997); 1998 – Kozłowski (1999), 1999–2000 – Porwisz i in. (2002)

Changes in tritium concentration (A) and isotopic composition (B) of therapeutic waters in selected wells of Muszyna

based on archive data by Porwisz *et al.* (2002). References: data from 1970 – Dowgiałło (1973); 1973 – Dowgiałło (unpublished – after Ciężkowski *et al.*, 1999); 1988 – WFiTJ; 1995 – Ciężkowski *et al.* (1996); 1996 – Poprawski *et al.* (1997); 1998 – Kozłowski (1999); 1999–2000 – Porwisz *et al.* (2002)

liny ciekłu i przecinającym antyklinę Muszyny, formację silnie zaburzoną tektonicznie i nasuniętą wzdłuż uskoku Muszyny-Góry Parkowej. Ich kolektorem są piaskowce eocenu. Ujmowane są w źródłach i otworach. Zasilanie regionalnego systemu przepływu odbywa się w strefach wododziałowych. Bazą drenażu są doliny Popradu oraz Muszynki, wzdłuż których grupują się źródła.

W Muszynie badaniami izotopowymi objęto 5 otworów ujmujących lecznicze szczawy o mineralizacji od 1202 do 7811 mg/dm<sup>3</sup>. Badania trytowe pozwoliły na określenie w większości przypadków procentowych udziałów wód z przepływów lokalnych (współczesnych) oraz z przepływów regionalnych (beztrytowych). Na figurze 2 przedstawiono wyniki zmian zawartości trytu w czasie, w otworach Antoni i P-2, w których w trakcie eksploatacji ma miejsce wymuszony dopływ wód. Obydwa otwory są eksploatowane w sposób niemal ciągły. Wielkość wydobywania zmienia się w cyklu rocznym, osiągając maksymalne wartości w okresie letnim, a minimalne w zimowym.

Na figurze 2A jest widoczny fragment krzywej przejścia trytu z drugiego piklu opadowego z lat 1962–63. Otwór P-2 ujmuje szczawy o mineralizacji niemal 1990 mg/dm<sup>3</sup>, z głębokości od 52 do 98 m. Wyznaczony udział wód współczesnych wynosi tu 60–80%, a ich wiek szacuje się na 25–30 lat. Uwagę zwraca wysoka zawartość trytu, która wyniosła w 2010 r. 7,5 T.U., wskazując na ułatwiony dopływ wód lokalnego systemu krążenia do horyzontu wodonośnego szczaw. Duży udział składowej bezpośredniego zasilania lokalnego potwierdza dość niska mineralizacja wód leczniczych.

W otworze Antoni występują wysoko zmineralizowane (7810 mg/dm<sup>3</sup>) szczawy lecznicze. W 2001 r. została wykonana renowacja otworu, w wyniku której, w beztrytowych wcześniej wodach, pojawił się ten składnik. Jego śladowe stężenie (obecnie ok. 1 TU) utrzymuje się od czasów renowacji otworu. Przypuszczalnie jest to efektem uruchomienia nowej drogi dopływu wód w obrębie lokalnego systemu.

Wartości delt izotopów stabilnych tlenu i wodoru w wodach z otworu Antoni są wyraźnie niższe w stosunku do poprzednio omawianych (fig. 2B). Wynoszą one, odpowiednio: ( $\delta^{18}\text{O} = -11,4\text{‰}$   $\delta\text{D} = -81\text{‰}$ ).

Zjawisko lżejszego składu izotopowego w tym rejonie, znane już wcześniej było tłumaczone jako występowanie wód tzw. glacialnych (Chowaniec i in., 2009). W opinii autorów teza ta jest wątpliwa, bowiem delty tlenowe wód z lodowców były ponad dwukrotnie niższe (Nowicki, 1999) natomiast efekt ten prawdopodobnie jest związany z okresem zwanym w klimatologii małą epoką lodową, trwającym od 1570 r. do 1900 r. (Pfister, 1980; Matthews, Briffa, 2005). W minimum tego okresu średnia temperatura była niższa od współczesnej o ok. 1,2°C. Efekt izotopowy wynikający z takiej różnicy temperatur, zgodny z zapisem funkcyjnym średniego efektu temperaturowego dla Polski Centralnej wyznaczonym wcześniej (Nowicki, 1999) wraz z efektem wysokościowym, potwierdza tę tezę. Autorzy szacują, że średni wiek tych wód wynosi prawdopodobnie około 200–300 lat.

Wyniki badań przedstawione powyżej w ogromnym skrócie wskazują na dużą wrażliwość omawianych systemów wodonośnych, m.in. na zmienne warunki ich eksplo-

atacji i zasilania. Dane dotyczące składu izotopów stabilnych tlenu i wodoru były podstawą do wyznaczenia wartości charakterystycznych dla opadów w tym regionie, a w jednym przypadku pozwoliły na określenie najbardziej prawdo-

podobnego czasu infiltracji wód w przepływie regionalnym. W kilku przypadkach uzyskano inne wyniki wieku wód niż w pracach wcześniejszych (np. Chowaniec i in., 2009).

## LITERATURA

- CHOWANIEC J., CIĘŻKOWSKI W., DULIŃSKI M., JÓZEFKO I., PORWISZ B., ZUBER A., 2009 — Typy chemiczne szczaw w Karpatach fliszowych a wiek wód. *Biul. Pań. Inst. Geol.*, **436**: 47–54.
- CIĘŻKOWSKI W., DOKTÓR S., GRANICZNY M., KABAT T., LIBER-MADZIARZ E., PRZYLIBSKI T., TEISSEYRE B., WISNIEWSKA M., ZUBER A., 1996 — Próba określenia obszarów zasilania wód leczniczych pochodzenia infiltracyjnego w Polsce. Z.B.U Zdroje, Wrocław [niepublikowane].
- CIĘŻKOWSKI W., JÓZEFKO I., SCHMALZ A., WITCZAK S., 1999 — Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne wód leczniczych i dwutlenku węgla (jako kopalinę towarzyszącą) ze złoża w uzdrowisku Krynica, oraz ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych (zwykłych oraz leczniczych) i o właściwościach leczniczych) w zlewni Krynicy. PWroc., Wrocław [niepublikowane].
- DOWGIAŁŁO J., 1973 — Wyniki badań składu izotopowego tlenu i wodoru w wodach podziemnych Polski południowej. *Biul. Inst. Geol.*, **277**: 319–334.
- FELTER A., NOWICKI Z., SOCHA J., SOKOŁOWSKI J., STOŻEK J., 2013 — Sprawozdanie końcowe z realizacji przedsięwzięcia pt. Prowadzenie Banku Danych Wód Podziemnych Zaliczonych do Kopalni. PIG-PIB, Warszawa [niepublikowane].
- KANIA J., JÓZEFKO I., WITCZAK S., 2009 — Metodyka oceny zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych rejonu Muszyny na podstawie modelowania w systemie ArcGIS i GMS. *Biul. Pań. Inst. Geol.*, **436**: 205–214.
- KOZŁOWSKI J., 1999 — Mieszanie się wód – podstawowy proces kształtowania się ostatecznego składu chemicznego wód leczniczych Polski (maszynopis pracy doktorskiej). PWroc., Wrocław [niepublikowane].
- MATTHEWS J.A., BRIFFA K.R., 2005 — The ‘Little Ice Age’: re-evaluation of an evolving concept. *Geografiska Annaler*, **87 A**: 17–36.
- NOWICKI Z. 1999 — Skład izotopów trwałych wód infiltrujących w późnym plejstocenie i holocenie na obszarze Polski Centralnej. W: Materiały IX Sympozjum „Współczesne Problemy Hydrogeologii” Warszawa-Kielce 1999. Wyd. Państw. Inst. Geol.
- PFISTER CH., 1980 — The climate of Switzerland in the last 450 years. *Geographica Helvetica*, **35**, 15–20.
- POPRAWSKI L., BINIAK G., JASIAK K., KOWALCZYK A., KRZEMPEK J., KUS S., LIMISIEWICZ P., MARSZAŁEK H., NAPIERAŁA K., OLSZEWSKI W. WĄSIK M., CISEK J., 1997 — Dokumentacja zasobów dyspozycyjnych i eksploatacyjnych wód podziemnych (zwykłych i leczniczych) na obszarze gmin uzdrowiskowych Krynica, Muszyna i Piwniczna. Hydrogeo Ltd, Wrocław [niepublikowane].
- PORWISZ B., CHOWANIEC J., GORCZYCA G., KOWALSKA J., KOZIARA T., 2002 — Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych i towarzyszących im lub występujących odrębnie wód potencjalnie leczniczych na obszarze Karpat i zapadliska przedkarpackiego. Przewod. Geol. S.A., Kraków [niepublikowane].

## SUMMARY

The results presented in the paper give new information indicating the high sensitivity of aquifer systems of Krynica-Zdrój and Muszyna region i.e. changing exploitation conditions. The tritium data interpretation based on fitting curves of tritium variability in precipitation (input) and in groundwa-

ters (output) allowed to determine their age. The composition of stable isotopes (oxygen and hydrogen) in groundwaters was used to determine the characteristic values of rainfall in the region. In one case it was possible to identify the most likely time of water infiltration in regional flow system.

