

Wstępne wyniki badań koncentracji radu i radonu w wodach podziemnych i powierzchniowych górnej części zlewni Kamienicy (Masyw Śnieżnika, Sudety)

Tadeusz A. Przylibski*, Stanisław Staško**, Sebastian Szczepanowski**,
Magdalena Modelska**, Jerzy Dorda***, Beata Kozłowska***

Preliminary results of determinations of radon and radium concentrations in surface and underground waters in the upper part of the Kamiénica River catchment basin (Śnieżnik Massif, Sudetes, SW Poland). Prz. Geol., 50: 436–440.

Summary. The paper presents preliminary results of concentration determinations of radioactive isotopes ^{222}Rn , ^{226}Ra and ^{228}Ra in surface and underground waters of the upper part of the Kamiénica drainage basin. The obtained results reveal evident temporal and spatial diversity in concentrations of these isotopes. It is then probable that obtaining more data will enable testing the application of these radon and radium isotopes as tracers of mixing zones of surface and underground waters in the study area. It will be also possible to use these isotopes as indicators of drainage of shallow (local) or deeper groundwater reservoir in crystalline rocks of the Śnieżnik Massif. The recorded high values of radon concentrations, reaching 1662 Bq/dm^3 in underground waters of this area allow to regard these waters as possessing medicinal properties. The area of the upper part of the Kamiénica drainage basin may be thus considered a prospective deposit of radon medicinal waters.

Key words: radium, radon, surface and underground waters, radon waters, Śnieżnik Massif, Sudetes, SW Poland

W górnej części zlewni Kamienicy w Masywie Śnieżnika od dłuższego czasu są prowadzone szczegółowe badania nad właściwościami hydraulicznymi i zmiennością drenażu w skałach krystalicznych (Kryza, 1983; Staško, 1996, 1999; Tarka, 1997). Rejestrowany odpływ podziemny w postaci wypływu ze sztolni „Śnieżnik” w dolinie Lej Mały dowodzi, że wartości współczynnika regresji wykazują znaczne zróżnicowanie. Jego wysokie wartości wydają się charakteryzować drenaż lokalnego, płytkiego zbiornika wód podziemnych, podczas gdy niskie wartości wskazują na drenaż głębokiego, regionalnego

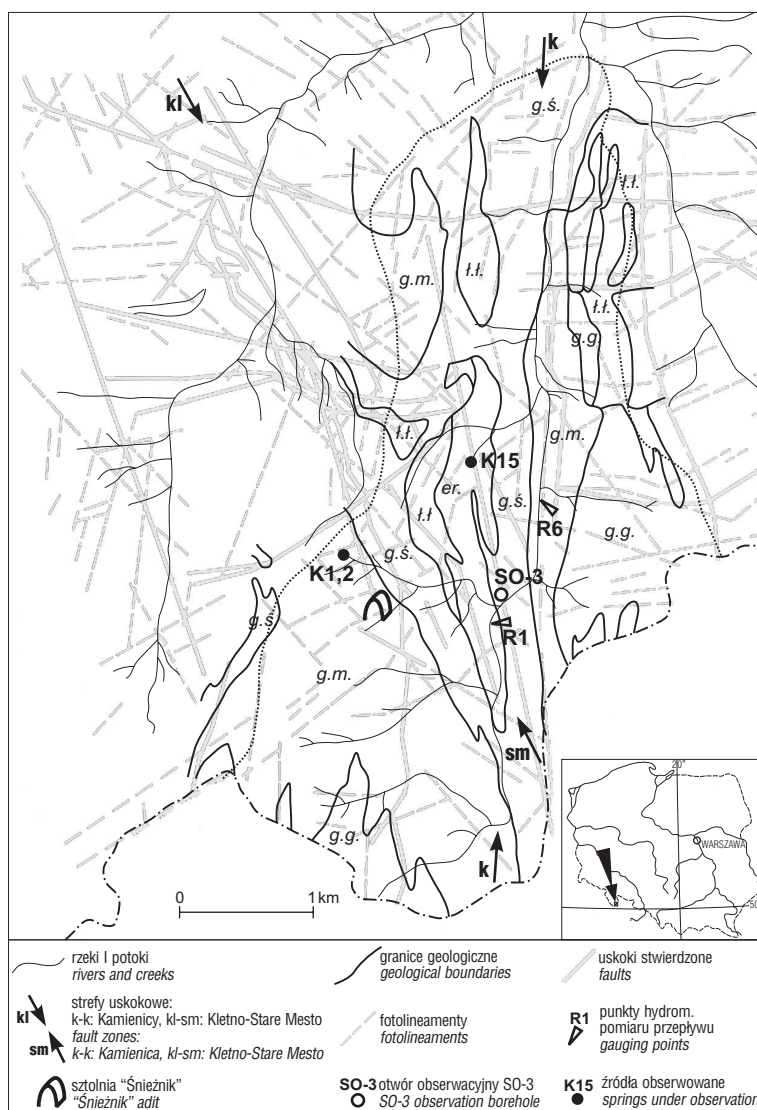
zbiornika, bądź przejściowego systemu. Dalszych badań wymaga wiek wód i tempo ich wymiany w środowisku skalnym oraz lokalizacja stref uprzywilejowanego krążenia (Staško, 1999).

Wydaje się, że zastosowanie izotopów radonu (^{222}Rn) i radu (^{226}Ra i ^{228}Ra), naturalnie występujących w wodach podziemnych i powierzchniowych oraz skałach tego rejonu może być pomocne przy rozwiązaniu niewyjaśnionych do tej pory kwestii. Izotopy te są powszechnie wykorzystywane w świecie w podobnych badaniach związanych z mieszaniem się wód powierzchniowych (rzecznych i morskich) i podziemnych, wyznaczaniem stref ich mieszania się oraz infiltracji wód powierzchniowych do zbiorników wód podziemnych, czy też dopływu wód podziemnych do wód powierzchniowych (Hoehn & von Gunten, 1989; Ellins i in., 1990; Bertin & Bourg, 1994; Corbett i in., 1997; Krest i in., 1999; Hussain i in., 1999; Hamada, 1999; Scott & Moran, 2001; Eikenberg i in., 2001), a także do wyznaczania dróg oraz tempa przepływu wód podziemnych

*Wydział Górnictwa, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

**Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław

***Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski, ul. Uniwersytecka 4, 40-007 Katowice



Ryc. 1. Lokalizacja punktów opróbowania wód podziemnych i powierzchniowych górnej części zlewni Kamienicy na tle mapy geologicznej, z zaznaczeniem stref uskokowych i fotolineamentów (wg Don & Opletal, 1997; Graniczny & Doktor, 1992); g.ś. — gnejsy śnieżnickie, g.m. — gnejsy mieszane, g.g. — gnejsy gieraltowskie, ł.ł. — łupki łuszczkowe, er. — erlany

Fig. 1. Surface and underground water sampling points in the upper Kamienica River catchment basin presented on geological map with marked fault zones and fotolineaments (after Don & Opletal, 1997; Graniczny & Doktor, 1992); g.ś. — Śnieżnik gneisses, g.m. — mixed gneisses, g.g. — Gieraltów gneisses, ł.ł. — mica schists, er. — erlans

(Genereux & Hemond, 1990; Cook i in., 1999; Corbett i in., 1999). W Polsce do tej pory brak jest informacji o prowadzeniu tego typu badań. Obiecująca jest także możliwość wykorzystania zjawiska spadku stężenia radonu w wodzie wraz z głębokością ujęcia wód podziemnych, które zaobserwowano w skałach krystalicznych Masywu Śnieżnika (Ciezkowski & Przylibski, 1997), jak również w innych skałach krystalicznych i osadowych Sudetów (Przylibski, 1997).

Geologia i hydrogeologia rejonu badań

Budowa geologiczna Masywu Śnieżnika została szczegółowo opisana w wielu pracach, z których wymienić należy opracowania Oberca (1972), Dumicza (1989), Dona i in. (1990), Dona i Opletala (1997), czy Turniaka i in. (2000). Według Dona i in. (1990) skały tego

Tab. 1. Zawartość ^{222}Rn oraz ^{226}Ra i ^{228}Ra w próbkach wód podziemnych i powierzchniowych pobranych w zlewni Kamienicy (Masyw Śnieżnika, Sudety) w czerwcu i grudniu 2000 r. Lokalizację punktów poboru próbek pokazano na ryc. 1

Table 1. Concentration of ^{222}Rn , ^{226}Ra and ^{228}Ra in ground and surface water samples collected in the Kamienica River catchment basin (Śnieżnik Massif, Sudetes) in June and December 2000. For location of sampling points see Fig. 1

Nr punktu pomiarowego	Nazwa ujęcia (miejsce poboru)	Data pobrania próbki	Stężenie ^{222}Rn	Stężenie ^{226}Ra	Stężenie ^{228}Ra
			[Bq/dm ³]		
Wody podziemne					
1	Wypływ ze sztolni	2000.06.26	1430 ± 65	0,011 ± 0,003	0,006 ± 0,003
		2000.12.18	1007 ± 45	0,012 ± 0,002	< 0,002
2	ródło K1 + K2	2000.06.26	80,0 ± 5,6	0,016 ± 0,002	0,009 ± 0,006
		2000.12.18	346 ± 23	0,007 ± 0,002	< 0,002
3	ródło K15	2000.06.26	20,8 ± 0,8	0,007 ± 0,001	0,007 ± 0,005
		2000.12.18	13,6 ± 0,6	< 0,002	< 0,002
4	Odwiert SO-3	2000.12.18	1662 ± 47	< 0,002	< 0,002
			1119 ± 42*	0,006 ± 0,002*	< 0,002*
Wody powierzchniowe					
1	Rzeka Kamienica Punkt R1	2000.06.26	1,3 ± 0,1	0,012 ± 0,002	0,006 ± 0,004
		2000.12.18	< 0,2	0,004 ± 0,001	0,006 ± 0,003
2	Rzeka Kamienica Punkt R6	2000.06.26	22,1 ± 1,1	0,011 ± 0,002	0,010 ± 0,006
		2000.12.18	19,4 ± 1,1	0,004 ± 0,002	< 0,002

obszaru są zaliczane do metamorfiku Łądka-Śnieżnika, będącego fragmentem kopuły orlicko-złotostockiej, która stanowi najdalej na wschód wysuniętą jednostkę Sudetów zachodnich. Wyróżnia się tutaj dwie główne formacje: starszej serii Młynowca i łupków metamorficznych serii strońskiej oraz młodszą gnejsów śnieżnickich, gierałtowskich i mieszanych. W badanej części zlewni Kamienicy występują łupki łuszczycowe, gnejsy gierałtowskie, śnieżnickie oraz gnejsy mieszane. W środkowej części stwierdza się także skały erlanowe. Zasięg poszczególnych wydzieli litologicznych ilustruje ryc. 1. Na mapie tej przedstawiono także stwierdzone i przypuszczalne strefy uskoku oraz fotolineamenty (Graniczny & Doktor, 1992). Widoczne jest znaczne zaangażowanie tektoniczne obszaru, wyrażające się wysoką liczbą stref dyslokacji nieciągłych, z których najważniejsze to uskok Kamienicy i strefa uskoku Kletno-Stare Mesto.

W jednej z tych stref odwiercono otwór obserwacyjny SO-3 do głębokości 25 m. Otwór ten przechodzi przez spękaną gnejsy śnieżnickie. Tym dużym strefom towarzyszą liczne diagonalne i prostopadłe mniejsze uskoki. Obecność pokryw zwietrzelinowych, ich charakter oraz znaczny stopień spękania skał krystalicznych sprawiają, że omawiany obszar cechują względnie dobre warunki hydrogeologiczne. Wody podziemne stwierdza się w trzech strefach: pokryw rumoszowych, strefach spękanych skał krystalicznych i głębokich strefach tektonicznych. Prowadzone od 1994 r. badania źródeł i wypływu ze sztolni „Śnieżnik” wykazują wysoki stopień zawodnienia omawianych obszarów (Staško, 1996, 1999; Staško & Tarka, 1994, 1996; Tarka, 1997; Ciężkowski i in., 1997). Wyrazem tego jest m.in.

średnia z wielolecia wydajność wypływu ze sztolni „Śnieżnik”, wynosząca ponad 23 dm³/s, tj. 83 m³/h. Wody podziemne tego rejonu charakteryzują się niską mineralizacją i dobrą jakością.

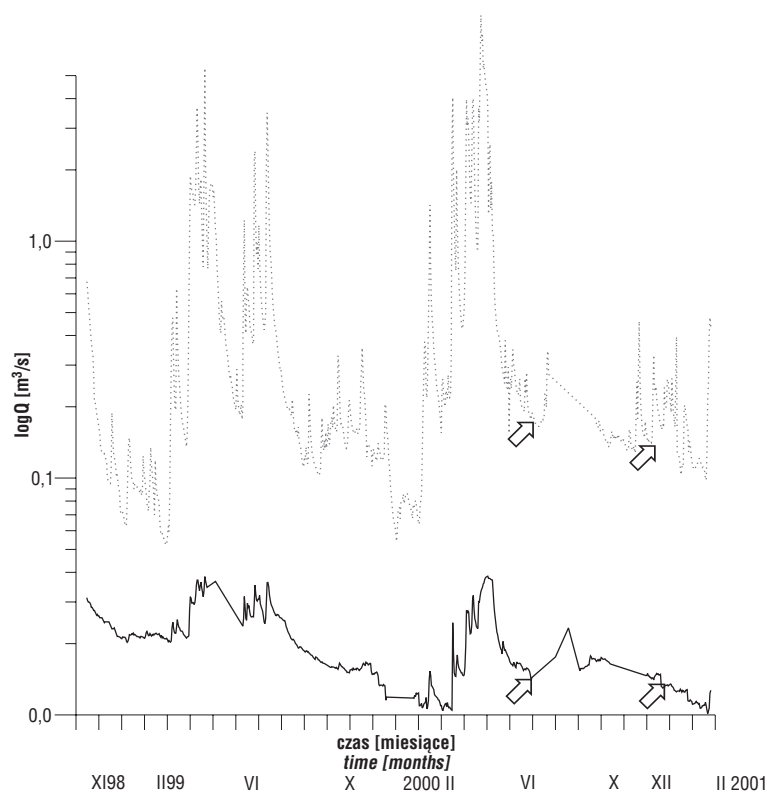
W wodach podziemnych tego rejonu wykonywano już wcześniej pomiary stężeń radonu przy okazji prowadzenia poszukiwań złóż fluorytu i uranu w tym rejonie (Przeniosło, 1970; Przeniosło & Sylwestrzak, 1969, 1971), wód geotermalnych (Ciężkowski & Płochniewski, 1983), oraz rozpatrywania możliwości zastosowania wód wypływających ze sztolni „Śnieżnik” w celach leczniczych (Ciężkowski & Ciężkowski, 1981, 1983). Uzyskane wyniki jednak do chwili obecnej nie zostały szczegółowo, ani kompleksowo zanalizowane i zinterpretowane, zwłaszcza w kontekście możliwości wykorzystania radonu jako naturalnego znacznika różnych procesów zachodzących w obrębie wód podziemnych i powierzchniowych tego rejonu.

Metody badań

W celu stwierdzenia ewentualnych zmian stężeń ²²²Rn oraz ²²⁶Ra i ²²⁸Ra w wodach podziemnych i powierzchniowych opróbowano wybrane punkty (ryc. 1) dwukrotnie w różnych porach roku. Opróbowanie w czerwcu 2000 roku przeprowadzono w okresie niskich stanów wody wypływającej ze sztolni „Śnieżnik” i średnich stanów wody w rzece Kamienicy, podczas gdy opróbowanie w grudniu 2000 roku zbiegło się w czasie z niskim stanem wody wypływającej ze sztolni „Śnieżnik” i podobnym średnim stanem wody w rzece (ryc. 2). Wybrane punkty opróbowania pozwoliły także na stwierdzenie spodziewanych różnic pod względem stężenia wspomnianych wyżej izotopów pomiędzy wodami powierzchniowymi, a podziemnymi oraz w obrębie samych wód podziemnych, jak i powierzchniowych. Wszystkie analizy próbek wody zostały wykonane w Laboratorium Badań Niskich Aktywności Zakładu Fizyki Jądrowej i Jej Zastosowań Instytutu Fizyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach.

Stężenie nuklidu ²²²Rn w próbach wód podziemnych i powierzchniowych oznaczono stosując międzynarodową normę uprzednio przetestowaną (Kozłowska i in., 1999). Zgodnie z nią próbkę wody o objętości 10 cm³, pobraną wprost ze źródła (ujęcia, wypływu) lub strumienia wprowadza się bezpośrednio do fiolki pomiarowej pod warstwę roztworu scyntylacyjnego o objętości 10 cm³, sporządzonego na bazie toluenu. Gazowy radon przechodzi z wody do scyntylatora z uwagi na jego bardzo dobrą rozpuszczalność w toluenie, wywołując scyntylacje rejestrowane przez licznik. Analiza zarejestrowanych impulsów pozwala na określenie aktywności ²²²Rn.

W celu oznaczenia zawartości izotopów radu w wodach podziemnych z badanych ujęć i źródeł oraz z wód powierzchniowych pobierano próbki o objętości 5 dm³. Pomiary zawartości ²²⁶Ra i ²²⁸Ra w pobranych próbkach wody zostały przeprowadzone techniką ciekłoscyntylacyjną przy użyciu licznika 1414WinSpectral α/β firmy Wallac. Licznik wyposażony jest w układ elektronicznej separacji impulsów pochodzących od izotopów α - i β - promienio-



Ryc. 2. Zmiany przepływu w rzece Kamienicy (linia przerywana) oraz w wypływie ze sztolni „Śnieżnik” (linia ciągła) w latach 1998–2001. Strzałkami zaznaczono momenty poboru próbek wód

Fig. 2. Flow changes in the Kamienica River (dashed line) and outlet changes from the „Śnieżnik” adit (solid line) during 1998–2001. The arrows mark moments of water sampling

twórczych. Układ ten pozwala na jednoczesne oznaczenie aktywności izotopów zawierających obie składowe promieniowania. W celu oznaczenia aktywności izotopów radu próby wody poddano preparatyce chemicznej, zgodnie z nieznacznie zmodyfikowaną polską normą (Chau i in., 1997). W metodzie tej izotopy radu wydzielone zostają z wody metodą współstrącania z barem i oczyszczone z pochodnych. Osad siarczanu radu i baru jest następnie przenoszony do naczynka scyntylacyjnego i wymieszany ze scyntylatorem żelującym. Tak przygotowane próby umieszczano w liczniku ciekłoscyntylacyjnym. Aktywność nuklidu ^{226}Ra oznaczano ze składowej widma promieniowania α , natomiast aktywność ^{228}Ra ze składowej widma promieniowania β (Hetman i in., 1998).

Dyskusja wyników

Wartości stężeń nuklidu ^{222}Rn oraz izotopów radu — ^{226}Ra i ^{228}Ra w wodach podziemnych i powierzchniowych ze wszystkich punktów opróbowania w czerwcu i grudniu 2000 r. przedstawiono w tab. 1. Stężenia ^{222}Rn w badanych próbach wód podziemnych należą w przypadku wypływu ze sztolni „Śnieżnik” oraz odwiertu SO-3 do jednych z najwyższych zanotowanych w Polsce w wodach naturalnych (Przylibski, 1997). Zgodnie z obowiązującymi przepisami (Rozporządzenie ..., 1994) wody te ze względu na rozpuszczoną w nich ilość radonu mogą zostać uznane za lecznicze, gdyż spełniają kryteria na podstawie których powinny być zaliczone do wód o właściwościach leczniczych — zawierają powyżej 74 Bq/dm^3 (2 nCi/dm^3) radonu. Stężenia ^{222}Rn zanotowane w wodach podziemnych wypływających ze sztolni „Śnieżnik” i ujętych w odwiercie SO-3 są porównywalne z najwyższymi notowanymi wartościami stężeń tego gazu w wodach leczniczych Świeradowa Zdroju (Przylibski, 1997, 1998; Przylibski & Żebrowski, 1996) i wyższe niż wartości notowane w Łądku Zdroju (Przylibski, 1997, 2000; Przylibski & Żebrowski, 1999; Kozłowska i in., 1999), uzdrowiskach znanych powszechnie w Polsce jako eksploatujące wody radonowe dla potrzeb zabiegów balneologicznych wykorzystujących radon (Przylibski, 1997).

Podobnie wodami o właściwościach leczniczych, które mogą zostać uznane za lecznicze ze względu na stężenie rozpuszczonego w nich radonu, są wody podziemne wypływające w źródle K1 + K2 (tab. 1). Znacznie niższe stężenia tego radioaktywnego gazu zanotowano natomiast w wodach podziemnych wypływających w źródle K15, które jest oddalone od wyżej wymienionych punktów opróbowania i leży w obrębie wychodni erlanów (tab. 1; ryc. 1). Znaczne zróżnicowanie stężeń ^{222}Rn występuje także w wodach powierzchniowych rzeki Kamienicy. W punkcie R1 zanotowano niskie wartości stężenia radonu charakterystyczne dla wód powierzchniowych, podczas gdy w punkcie R6 zanotowane wartości są dużo wyższe od przeciętnych, wynoszących do kilku Bq/dm^3 (tab. 1) (Cothorn & Smith, 1987). Wyraźnie widoczne jest więc przestrzenne zróżnicowanie stężeń radonu, zarówno w wodach podziemnych, jak i powierzchniowych. Istotne są także różnice w wartościach zanotowanych w tych samych punktach pomiędzy czerwcem a grudniem 2000 r. (tab. 1).

Zanotowane wartości stężeń izotopów radu — ^{226}Ra i ^{228}Ra również wykazują istotne zróżnicowanie, szczegó-

nie w przestrzeni. Najwyższe wartości zanotowano w wodach podziemnych wypływających w źródle K1 + K2 oraz w wypływie ze sztolni „Śnieżnik” (tab. 1). Mniejsze zróżnicowanie występuje w wodach powierzchniowych rzeki Kamienicy. Natomiast zróżnicowanie wartości stężeń w poszczególnych punktach pomiędzy czerwcem a grudniem 2000 r. jest szczególnie widoczne w wodach powierzchniowych oraz w wodach podziemnych wypływających w źródłach K1 + K2 i K15. W wodach podziemnych wypływających ze sztolni „Śnieżnik” zróżnicowania takiego nie stwierdzono (tab. 1). Wartości stężeń obu izotopów radu zmierzone w wodach podziemnych są tylko nieznacznie wyższe od wartości zanotowanych w wodach powierzchniowych (tab. 1). Stwierdzone wartości stężeń obu izotopów radu, jak i ich wzajemne proporcje, w wodach podziemnych badanego obszaru są typowe dla słabo zmineralizowanych wód podziemnych Sudetów (Przylibski i in., 2002). Może to świadczyć o tym, że mamy w tym wypadku do czynienia z wodami raczej płytkiego krążenia. Niemniej jednak zmiany stężeń radu w czasie, w tych samych punktach opróbowania sugerują, że mineralizacja tych wód zmienia się w czasie, a więc możliwe jest także, że zmienia się w wypływającej wodzie procentowy udział wód głębszego krążenia (o potencjalnie dłuższym czasie podziemnego przepływu i wyższej mineralizacji ogólnej). Wobec niewielkiej ilości danych powyższa interpretacja w chwili obecnej ma raczej charakter wstępny.

Wnioski

Na podstawie powyższych faktów i ich wstępnej interpretacji można stwierdzić, że zanotowane zróżnicowanie czasowe i przestrzenne wartości stężeń izotopów ^{222}Rn oraz ^{226}Ra i ^{228}Ra w wodach podziemnych i powierzchniowych górnej części zlewni Kamienicy jest wyraźne. Wobec niewielkiej ilości danych jest niezbędne prowadzenie dalszych pomiarów w różnych porach roku i jednocześnie w różnych stanach wód powierzchniowych i wydajnościach ujęć i źródeł wód podziemnych. Jest wysoce prawdopodobne, że większa ilość wyników z tego obszaru umożliwi przetestowanie możliwości zastosowania wszystkich wymienionych izotopów, jako znaczników stref mieszania się wód podziemnych i powierzchniowych, a także jako wskaźników drenażu płytkiego (lokalnego) lub głębszego zbiornika wód podziemnych w skałach krystalicznych masywu Śnieżnika.

Zanotowane wysokie stężenia ^{222}Rn w wodach podziemnych tego rejonu mogą być także wykorzystane w przyszłości do określenia obszaru występowania wód radonowych o właściwościach leczniczych w tej części masywu Śnieżnika. W chwili obecnej jednak, wobec faktu niewykorzystania istniejących (udokumentowanych i zagospodarowanych) zasobów radonowych wód leczniczych w Sudetach, perspektywa taka wydaje się odległa i ekonomicznie nieuzasadniona.

Tadeusz A. Przylibski większość prac wykonał przy wykorzystaniu środków z grantu KBN nr 9T12B04219.

Literatura

BERTIN C. & BOURG A. C. M. 1994 — Radon-222 and chloride as natural tracers of the infiltration of river water into an alluvial aquifer

- in which there is significant river/groundwater mixing. *Environmental Science & Technology*, 28: 794–798.
- CHAU N. D., NIEWODNICZAŃSKI J., DORDA J., OCHOŃSKI A., CHRUSCIEL E. & TOMZA I. 1997 — Determination of radium isotopes in mine waters through alpha- and beta- activities measured by liquid scintillation spectrometry. *Jour. Radioanal. Nuclear Chem.*, 222: 69–74.
- CIEŻKOWSKI M. & CIEŻKOWSKI W. 1981 — Możliwość zastosowania wód radonowych sztolni Śnieżnik do celów leczniczych. *Probl. Uzdrowiskowe*, 167/170: 181–183.
- CIEŻKOWSKI M. & CIEŻKOWSKI W. 1983 — Wody radonowe sztolni „Śnieżnik”. II Ogólnopolskie Symp. Współ. Probl. Hydrogeol. Regionalnej, Łądek Zdrój, 13–16.10.1982. Wyd. Uniwer. Wrocław, Wrocław, 1983: 295–298.
- CIEŻKOWSKI W., KRYZA H., KRYZA J., PULINA M., ŘEHAK J., TARKA R. & STAŠKO S. 1997 — Wody podziemne Masywu Śnieżnika. [W:] Jahn A., Kozłowski S., Pulina M. (red.), Masyw Śnieżnika — zmiany w środowisku przyrodniczym. Pol. Agencja Ekolog.
- CIEŻKOWSKI W. & PŁOCHNIEWSKI Z. 1983 — Poszukiwanie wód termalnych w rejonie Bolesławowa w Masywie Śnieżnika. II Ogólnopolskie Symp. Współ. Probl. Hydrogeol. Regionalnej, Łądek Zdrój, 13–16.10.1982. Wyd. Uniw. Wrocław, Wrocław 1983: 262–270.
- CIEŻKOWSKI W. & PRZYLIBSKI T. A. 1997 — Radon in waters from health resorts of the Sudety Mts. (SW Poland). *Applied Radiation and Isotopes*, 48: 855–856.
- COOK P. G., LOVE A. J. & DIGHTON J. C. 1999 — Inferring ground water flow in fractured rock from dissolved radon. *Ground Water*, 37: 606–610.
- CORBETT D. R., BURNETT W. C., CABLE P. H. & CLARK S. B. 1997 — Radon tracing of groundwater input into Par Pond, Savannah River Site. *Jour. Hydrology*, 203: 209–227.
- CORBETT D. R., CHANTON J., BURNETT W., DILLON K., RUTKOWSKI Ch. & FOURQUREAN J. W. 1999 — Patterns of groundwater discharge into Florida Bay. *Limnol. Oceanogr.*, 44: 1045–1055.
- COTHERN C. R. & SMITH J. E. Jr (eds.) 1987 — *Environmental radon*. Plenum Press, New York.
- DON J., DUMICZ M., WOJCIECHOWSKA I. & ŻELA NIEWICZ A. 1990 — Lithology and tectonics of the Orlica-Śnieżnik dome, Sudetes, Recent state of knowledge. *N. Jb. Geol. Paleont. Abh.*, 179: 159–188.
- DON J. & OPLETAŁ M. 1997 — Budowa i ewolucja geologiczna Masywu Śnieżnika. [W:] Jahn A., Kozłowski S., Pulina M. (red.), Masyw Śnieżnika — zmiany w środowisku przyrodniczym. Pol. Agencja Ekolog., Warszawa.
- DUMICZ M. 1989 — Następstwo serii gnejsowych masywu Śnieżnika w świetle analizy mezostrukturalnej wybranych obszarów w jednostkach geologicznych Międzygórze i Gierałtowa. *Geol. Sudet.*, 24: 139–158.
- EIKENBERG J., TRICCA A., VEZZU G., STILLE P., BAJO S. & RUETHI M. 2001 — ^{228}Ra / ^{226}Ra / ^{224}Ra and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope relationship for determining interactions between ground and river water in the upper Rhine valley. *Jour. Environm. Radioactivity*, 54: 133–162.
- ELLINS K. K., ROMAN-MAS A. & LEE R. 1990 — Using ^{222}Rn to examine groundwater/surface discharge interaction in the Rio Grande de Manati, Puerto Rico. *Jour. Hydrology*, 115: 319–341.
- GENEREUX D. P., HEMOND H. F. 1990 — Naturally occurring radon 222 as a tracer for streamflow generation: steady state methodology and field example. *Water Resources Research*, 26: 3065–3075.
- GRANICZNY M. & DOKTÓR S. 1992 — Mapa fotolimeamentów radarowych. Państw. Inst. Geol.
- HAMADA H. 1999 — Analysis of the interaction between surface water and groundwater using radon-222. *JARQ*, 33: 261–265.
- HETMAN A., DORDA J. & ZIPPER W. 1998 — Determination of radium isotopes concentrations in mineral waters by liquid scintillation method. *Nukleonika*, 43: 481–488.
- HOEHN E. & VON GUNTEN H. R. 1989 — Radon in groundwater: a tool to assess infiltration from surface waters to aquifers. *Water Resources Research*, 25: 1795–1803.
- HUSSAIN N., CHURCH T. M. & KIM G. 1999 — Use of ^{222}Rn and ^{226}Ra to trace groundwater discharge into the Chesapeake Bay. *Marine Chemistry*, 65: 127–134.
- KOZŁOWSKA B., HETMAN A. & ZIPPER W. 1999 — Determination of ^{222}Rn in natural water samples from health resorts in the Sudety mountains by the liquid scintillation technique. *Applied Radiation and Isotopes*, 51: 475–480.
- KREST J. M., MOORE W. S. & RAMA 1999 — ^{226}Ra and ^{228}Ra in the mixing zones of the Mississippi and Atchafalaya Rivers: indicators of groundwater input. *Marine Chemistry*, 64: 129–152.
- KRYZA H. 1983 — Wody podziemne północnej części Masywu Śnieżnika. *Współ. Probl. Hydrogeol.*, Uniwer. Wrocław, Wrocław: 59–77.
- OBERC J. 1972 — Budowa geologiczna Polski, T. 4, Tektonika, cz. 2, Sudety i obszary przyległe. Wyd. Geol.
- PRZENIOSŁO S. 1970 — Geochemia uranu w aluwjach wschodniej części obszaru metamorfiku Łądko i Śnieżnika Kłodzkiego. *Biul. Inst. Geol.*, 224, Z Bad. Petrograf.-Miner. Geochem. w Polsce, t. IV: 205–298.
- PRZENIOSŁO S. & SYLWESTRZAK H. 1969 — Przejawy mineralizacji na tle struktury metamorfiku Łądko i Śnieżnika. *Prz. Geol.*, 17: 442–444.
- PRZENIOSŁO S. & SYLWESTRZAK H. 1971 — Mineralizacja fluorytowa na wschodnich zboczach Śnieżnika Kłodzkiego. *Kwart. Geol.*, 15: 251–261.
- PRZYLIBSKI T. A. 1997 — Wybrane uwarunkowania występowania radonu-222 w Sudetach. *Arch. Inst. Geotech. Hydrotech. Polit. Wrocław, Raport Ser. PRE nr 577*, Wrocław.
- PRZYLIBSKI T. A. 1998 — Zmiany stężeń radonu w podziemnych wodach leczniczych Świeradowa Zdroju (Sudety). *Prz. Geol.*, 46: 365–370.
- PRZYLIBSKI T. A. 2000 — ^{222}Rn concentration changes in medicinal groundwaters of Łądek Zdrój (Sudety Mountains, SW Poland). *Jour. Environm. Radioactivity*, 48: 327–347.
- PRZYLIBSKI T. A., DORDA J. & KOZŁOWSKA B. 2002 (w druku) — The occurrence of ^{226}Ra and ^{228}Ra in groundwaters of Polish Sudety Mountains. *Nukleonika*.
- PRZYLIBSKI T. A. & ŻEBROWSKI A. 1996 — Origin of radon in medicinal waters of Świeradów Zdrój. *Nukleonika*, 41: 109–115.
- PRZYLIBSKI T. A. & ŻEBROWSKI A. 1999 — Origin of radon in medicinal waters of Łądek Zdrój (Sudety Mountains, SW Poland). *Jour. Environm. Radioactivity*, 46: 121–129.
- Rozporządzenie** Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dn. 23.08.1994 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinna odpowiadać dokumentacja hydrogeologiczna i geologiczno-inżynierska. *Dz. U.*, nr 93, poz. 444.
- SCOTT M. K. & MORAN S. B. 2001 — Ground water input to coastal salt ponds of southern Rhode Island estimated using ^{226}Ra as a tracer. *Jour. Environm. Radioactivity*, 54: 163–174.
- STAŠKO S. 1996 — Wody podziemne w skałach krystalicznych na podstawie badań wybranych obszarów Sudetów polskich. *Pr. Geol.-Miner.*, 53. Acta Univer. Wratisl., 1870: 1–86.
- STAŠKO S. 1999 — Wyniki hydrogeologicznych badań skał krystalicznych w Sudetach. *Współ. Probl. Hydrogeol.*, 9, Państw. Inst. Geol.: 337–342.
- STAŠKO S. & TARKA R. 1994 — Obliczenia zasobów wód podziemnych w obszarach górskich na przykładzie badań wybranych zlewni Sudetów. *Zesz. Nauk. Akad. Roln.*, Wrocław, 248: 279–286.
- STAŠKO S. & TARKA R. 1996 — Hydraulic parameters of hard rocks based on long-term field experiment in the Polish Sudetes. *Acta Univer. Carolinae-Geol.*, 40: 167–178.
- TARKA R. 1997 — Zasilanie wód podziemnych w krystalicznych masywach górskich na przykładzie badań w Masywie Śnieżnika. *Pr. Geol.-Miner.*, 56, Acta Univer. Wratisl., 1964: 1–66.
- TURNIAK K., MAZUR S. & WYSOCHAŃSKI R. 2000 — SHRIMP zircon geochronology and geochemistry of the Orlica-Śnieżnik gneisses (Variscan belt of Central Europe) and their tectonic implications. *Geodinamica Acta*, 13: 293–312.