

Poziom radioaktywności naturalnej w starych sztolniach uranowych (Dolina Białego) oraz w Jaskiniach Mylnej i Mroźnej (Dolina Kościeliska)

Krzysztof Kozak¹, Jadwiga Mazur¹, Janja Vaupotic², Ivan Kobal²,
Dominik Grządziel¹, Khaled M.H. Omran³

¹ Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków

² Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Słowenia

³ South Valley University, Quena, Egipt

e-mail: Krzysztof.Kozak@ifj.edu.pl

Słowa kluczowe: promieniotwórczość naturalna, radon, uran, moc dawki, promieniowanie gamma

Keywords: natural radioactivity, radon, gamma dose rate, gamma radiation

Streszczenie

Informacje o poziomie naturalnej promieniotwórczości, która jest integralnym komponentem środowiska stanowią ważne i konieczne uzupełnienie zagadnienia naukowego poznania obszaru Tatr. Obszar Tatr i Podhala (w przeciwieństwie do rejonu Sudetów) nie był dotychczas przedmiotem szerzej zakrojonych badań mających na celu określenie poziomu naturalnej promieniotwórczości, a w szczególności rozkładu stężeń gazowego izotopu radonu (²²²Rn) pochodzącego z naturalnego szeregu uranowego. Radon, który odpowiada za około połowę średniej dawki rocznej, jaką otrzymują mieszkańcy Polski, jest szczególnie ważnym izotopem w aspekcie ochrony radiologicznej populacji.

W ramach współpracy międzynarodowej pomiędzy Instytutem Fizyki Jądrowej PAN (Kraków, Polska) i Jozef Stefan Institute (Ljubljana, Słowenia) prowadzono w czerwcu 2010 pilotażowe pomiary poziomów naturalnej radioaktywności w wybranych miejscach na terenie Tatrzańskie-go Parku Narodowego. Pomiarami objęto dwie stare sztolnie uranowe w Dolinie Białego oraz Jaskinie Mylną i Mroźną w Dolinie Kościeliskiej. Zmierzono moc dawki promieniowania gamma, stężenie izotopu radonu (²²²Rn), a także stężenia izotopów naturalnych (potasu ⁴⁰K, radu ²²⁶Ra i toru ²³²Th) w próbkach skalnych. W sztolniach uranowych zmierzono stężenie radonu w próbkach wody z terenu sztolni i wypływających strumieni.

Wprowadzenie

Wszystkie substancje mineralne zawierają naturalne pierwiastki promieniotwórcze. Są to długożyciowe radionuklidy powstałe razem z większością stabilnej materii

tworzącej później cały układ planetarny Słońca, w tym i Ziemię. Ze względu na wiek Ziemi wynoszący około $4,5 \times 10^9$ lat, do naszych czasów na mierzalnym poziomie, mogły przetrwać tylko izotopy o czasie połowicznego zaniku $T_{1/2} > 10^8$ lat. Najbardziej istotnymi z nich są: U-238 ($T_{1/2} = 4,47 \times 10^9$ lat), Th-232 ($T_{1/2} = 14,05 \times 10^9$ lat), U-235 ($T_{1/2} = 0,704 \times 10^9$ lat) oraz K-40 ($T_{1/2} = 1,28 \times 10^9$ lat). Sekwencyjny rozpad promieniotwórczy tworzy szeregi promieniotwórcze m.in. uranowy zawierający rad (Ra-226) i torowy, zawierający tor (Th-232). Największe średnie stężenia Ra-226 i Th-232 występuje na terenie południowej części Polski, zgodnie ze strukturą geologiczną naszego kraju (Atlas Radiologiczny Polski, 2006).

Pierwiastki te wysyłając promieniowanie typu alfa, beta i gamma powodują jonizację ośrodka i dlatego też promieniowanie to nazywane jest promieniowaniem jonizującym.

Statystyczny Polak otrzymuje rocznie ze wszystkich źródeł promieniowania dawkę efektywną około 3 mSv, z czego blisko 80% pochodzi od źródeł naturalnych (promieniowanie kosmiczne i promieniowanie naturalnych izotopów obecnych w skorupie ziemskiej). Znaczna część tej dawki (około 1,5 mSv) jest spowodowana przez radon, jedyny gazowy naturalny pierwiastek promieniotwórczy. Radon, powstający w wyniku rozpadu promieniotwórczego radu (Ra-226), jest niewidocznym, bez zapachu i smaku gazem szlachetnym. Głównym źródłem radonu w atmosferze jest jego emisja z gleby, gdzie jego stężenia sięgają tysięcy bekereli na metr sześcienny (1 Bekerel to 1 rozpad promieniotwórczy atomu w ciągu 1 sekundy). Wielkość ekshalacji (wzrostywanian się) radonu z gruntu jest zależna od miejsca (rodzaj gleby, geologia podłoża) oraz od warunków atmosferycznych (ciśnienie, siła i kierunek wiatru, wilgotność, obecność pokrywy śnieżnej, itp.). Radon jako gaz szlachetny nie wpływa bezpośrednio na nasz organizm. Rozpada się on, z czasem półrozpadu $T_{1/2} = 3,8$ dnia, emitując cząstki alfa, na krótkożyciowe pochodne (izotopy polonu: ²¹⁸Po i ²¹⁴Po, i ołów ²¹⁰Pb), które następnie łączą się

z aerozolami i wnikają do układu oddechowego. Wysokie stężenia radonu (rzędu tysięcy bekereli w m³), a w konsekwencji jego pochodnych, mogą być szkodliwe dla zdrowia. Pochodne radonu związane z pyłami obecnymi w powietrzu osadzają się w płucach i mogą stanowić zagrożenie wystąpienia chorób nowotworowych.

W przeciwieństwie do obszaru Sudetów obszar Tatrzańskiego Parku Narodowego (TPN) nie jest zbyt dobrze rozpoznany pod kątem naturalnej promieniotwórczości. Badania występowania sztucznego izotopu promieniotwórczego Cs-137 i naturalnego potasu K-40 w powierzchniowych warstwach gleby można znaleźć w pracach Kubicy i in. (Kubica, 2006; Kubica, 2010).

Szczególnie ciekawym rejonem TPN z punktu widzenia naturalnej promieniotwórczości jest Dolina Białego, gdzie w latach 50-tych dwudziestego wieku prowadzono poszukiwania rud uranu w celach militarnych. W Tatrach poszukiwano rud uranu także w Kopach Sołtysich i w rejonie Hali na Stołach, jednak szczególnie zainteresowano się Doliną Białego. Uran, który tam odkryto znajdował się w warstwach triasowych łupków, w miejscach, gdzie w masie skalnej obecne były wulkaniczne tufity. Podczas prac wydobywczych dolina była zamknięta dla turystów i pilnie strzeżona przez radzieckich żołnierzy. Po pięciu latach badań okazało się, że złoża są zbyt ubogie, aby mogły posłużyć do celów militarnych i dolinę otwarto dla turystów. Z uwagi na tajność prowadzonych wtedy prac wydobywczych autorom nie udało się dotrzeć do danych na temat poziomów stężeń uranu w wydobywanej rudzie.

Stare sztolnie uranowe znajdują się we wschodnim zboczu Doliny Białego i nie są udostępnione dla turystów. Jesienią 2009 roku przeprowadzono wstępne pomiary mocy dawki promieniowania gamma w tych sztolniach (Kłosowski i in., 2010).

W czerwcu 2010 roku zespół Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN we współpracy z naukowcami z Jozef Stefan Institute ze Słowenii przeprowadził szerzej zakrojone badania w sztolniach w Dolinie Białego. Poza pomiarem mocy dawki promieniowania gamma zbadano stężenia gazowego radonu we wnętrzu sztolni, zmierzono stężenia izotopów potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232 w próbkach skalnych, a także stężenia radonu w wodzie zalegającej w sztolniach. Podobne pomiary wykonano w dwóch jaskiniach dostępnych dla turystów w Dolinie Kościeliskiej – w Jaskini Mroźnej i Jaskini Mylnej. Badania te są prowadzone w ramach kontynuacji naukowego projektu badawczego dotyczącego określania sytuacji radiologicznej na obszarach o podwyższonym tle promieniowania naturalnego w Słowenii i w Polsce (Vaupotic i in., 2010).

Informacje o poziomie naturalnej promieniotwórczości, która jest integralnym komponentem środowiska stanowią ważne i konieczne uzupełnienie zagadnienia naukowego poznania obszaru Tatr.

Metody pomiarowe

Pomiar mocy równoważnika dawki promieniowania gamma

Pomiar mocy równoważnika dawki promieniowania gamma (dokładniej: mocy przestrzennego równoważnika dawki) przeprowadzono za pomocą mierników – GAMMATRACER (GENITRON INSTRUMENTS GmbH, Niemcy). Mierniki są wykalibrowane w jednostkach mocy równoważnika dawki H*(10) (*ambient dose equivalent rate*) [nSv/h] zgodnie z definicją podaną przez EU 96/29 (identyczna z podanymi przez ICRU i IAEA) i PN-92/J-01003/2.

W pomiarach mocy równoważnika dawki wykorzystywano także przenośny spektrometr INSPECTOR 1000 (*Canberra Packard*) z inteligentnym stabilizowanym detektorem scyntylicyjnym 2"x2".

Pomiar stężenia radonu Rn-222

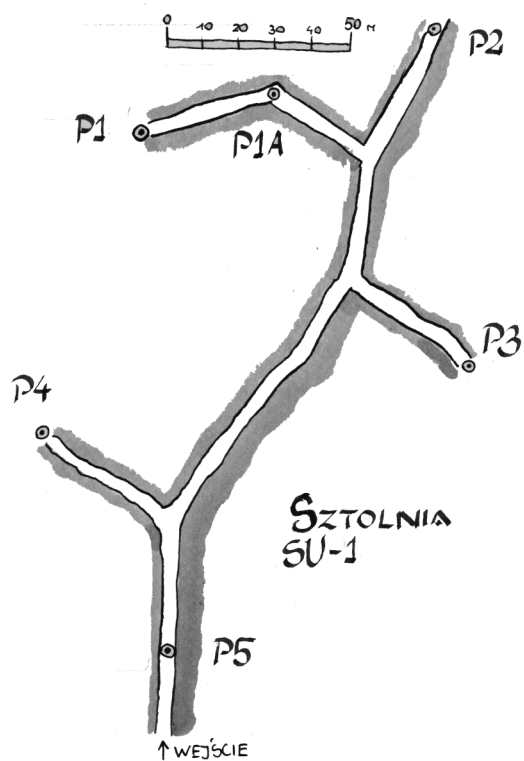
Pomiary przeprowadzono dwoma przyrządami: AlphaGUARD PQ 2000 PRO (GENITRON INSTRUMENTS GmbH, Niemcy) oraz RTM1688-2 (SARAD GmbH, Niemcy).

AlphaGUARD pracuje jako impulsowa komora jonizacyjna, dane rejestrowane są w pamięci przyrządu w sposób ciągły w 1-, 10- lub 60-minutowych przedziałach czasu. Po zakończeniu ekspozycji dane przesyłane są do komputera i analizowane przy pomocy programu DataEXPERT. Przyrząd umożliwia pomiary stężeń radonu w zakresie od 2 Bq/m³ do 2 000 000 Bq/m³. Ta metoda pomiaru jest metodą akredytowaną (nr akredytacji Polskiego Centrum Akredytacji: AB 788). Miernik RTM1688-2 rejestruje stężenia radonu metodą alfa-spektrometryczną (detektor półprzewodnikowy) w zakresie do 10 MBq/m³ w interwałach od 1 minuty do 4 godzin. Oba mierniki posiadają możliwość rejestracji temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza.

Pomiar stężenia radonu prowadzony był także za pomocą komór Lucasa. Metoda polega na poborze próbek powietrza do komory scyntylicyjnej. Emitowane w czasie rozpadu cząstki alfa w momencie zderzenia się ze ściankami komory pokrytymi siarczkiem cynku wywołują efekty świetlne. Komora pomiarowa połączona jest oknem z fotopowielaczem, który przekształca efekty świetlne w mierzalne impulsy elektryczne. Są one następnie rejestrowane przez licznik (Szot, 1993).

Pomiar stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych: radu (Ra-226), toru (Th-232) i potasu (K-40) w próbkach skalnych

Zastosowano akredytowaną metodę niskotłowej spektrometrii promieniowania gamma (nr akredytacji Polskiego Centrum Akredytacji: AB 788). W pomiarach wykorzystano tor spektrometryczny z sondą z kryształem scyntylicyjnym NaI(Tl) 3"x3" umieszczoną w niskotłowym domku osłonnym. W celu obliczenia stężeń naturalnych izotopów analizowane są linie promieniowania gamma pochodzące od izotopów: K-40, Bi-214 i Tl-208 w kolejnych trzech oknach pomiarowych (metoda „3-oknowa”).



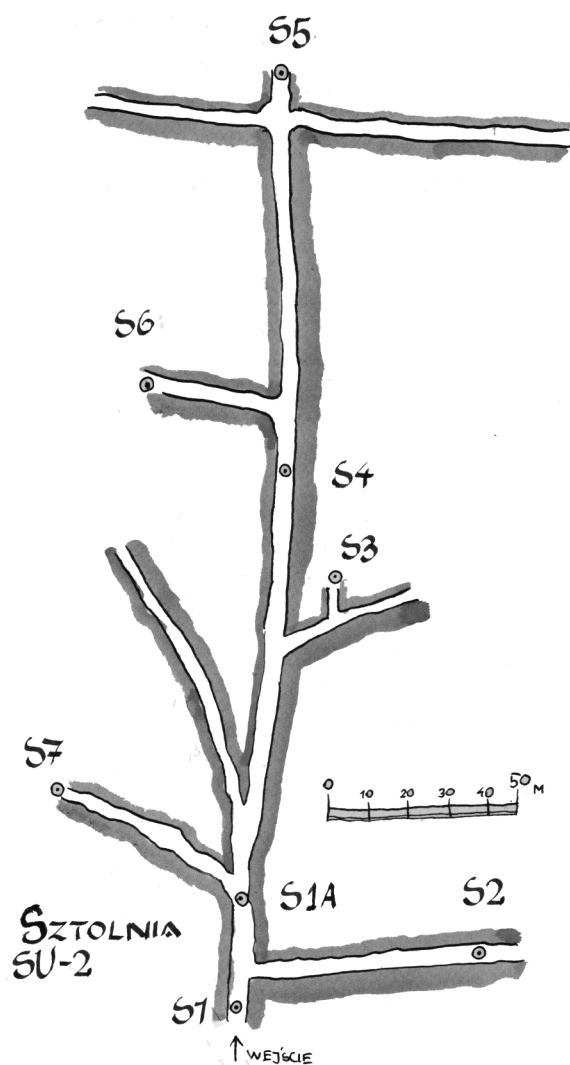
Ryc. 1. Schematyczne plany starych sztolni uranowych w Dolinie Białego

Fig. 1. Schematic maps of old uranium mines in The Valley of the White

W pomiarach wykorzystywane były atestowane wzorce: RGU-1, RGTh-1, RGK-1 (IAEA – Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, Wiedeń).

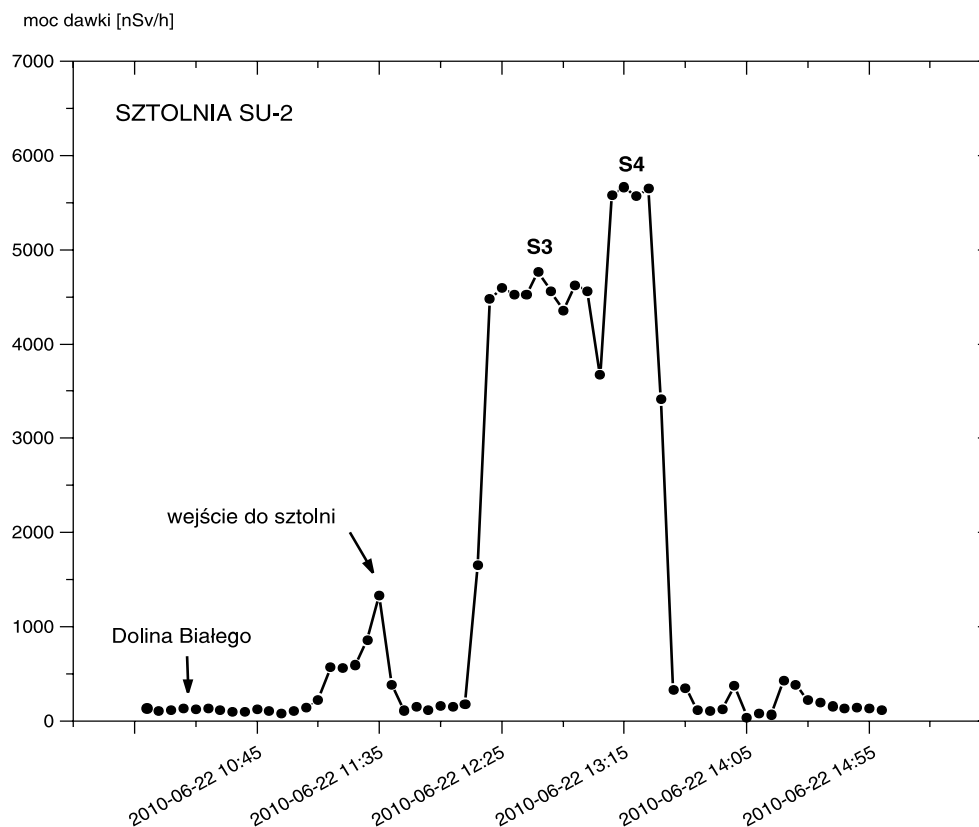
Wyniki

W Dolinie Białego pomiary przeprowadzono w dwóch starych sztolniach uranowych. Pierwsza z nich (SU-1) znajduje się bezpośrednio przy szlaku turystycznym, a druga (SU-2) położona jest ok. 100 m powyżej. Schematyczny plan sztolni SU-1 i sztolni SU-2 przedstawiono na rysunku 1. Na planach sztolni zaznaczone są punkty, w których mierzono stężenie radonu i moc równoważnika dawki promieniowania gamma. Pomiary stężeń radonu i mocy dawki wykonano na poziomie dna sztolni w 5 punktach sztolni SU-1 (punkty P1–P5) oraz w 7 punktach sztolni SU-2 (punkty S1–S7). Łączna długość korytarzy sztolni SU-1 wynosi ok. 260 m, zaś sztolnia SU-2 jest bardziej rozległa o orientacyjnej długości korytarzy ok. 440 m. Szerokość korytarzy wynosi ok. 1,5–2,0 m a wysokość ok. 2 m. W trakcie pomiarów dna obu sztolni były pokryte wodą (wysokość wody w sztolni SU-2 dochodziła do ok. 0,35 m).



Wyniki pomiarów zebrano w tabeli 1. W sztolni SU-2 stwierdzono wyższe poziomy zarówno stężenia radonu jak i mocy dawki. Przykładowy przebieg zmian mocy dawki promieniowania gamma w sztolni SU-2 przedstawia rysunek 2. Moce równoważnika dawki tła promieniowania gamma (łącznie z promieniowaniem kosmicznym) w roku 2009 dla Polski zawierają się w zakresie od 56 nSv/h do 190 nSv/h, z wartością średnią ok. 110 nSv/h (Raport PAA, 2010). Widać wyraźnie zwiększony poziom mocy dawki wewnątrz sztolni, pomimo zredukowania udziału promieniowania kosmicznego w dawce. Maksymalne wartości mocy dawki (4555 nSv/h i 5616 nSv/h) zaobserwowano w dwóch punktach pomiarowych sztolni SU-2 (punkty S3 i S4) znajdujących się w odległości ok. 2 m od odsłoniętej warstwy rudy uranowej. Pomiar przeprowadzony bezpośrednio przy tej warstwie (odległość ok. 5 cm) wykazał wartość 7700 nSv/h (rysunek 3).

W punktach S3 i S4 zarejestrowano także najwyższe stężenia radonu: 28 200 Bq/m³ i 15 500 Bq/m³. W pozostałej części sztolni SU-2 stężenia radonu zawierają się w granicach od ok. 3000 Bq/m³ do ponad 12 000 Bq/m³ (punkty S5, S6). Wyniki pomiarów stężeń radonu wykonywane dwoma metodami (AlphaGUARD – pomiar ciągły



Ryc. 2. Moc dawki promieniowania gamma zmierzona w sztolni SU-2

Fig. 2. Gamma dose rate measured in old uranium mine SU-2

Tabela 1. Wyniki pomiarów stężenia radonu i mocy dawki promieniowania gamma w starych sztolniach uranowych w Dolinie Białego

Table 1. Results of radon concentration and gamma dose rate in old uranium mines in Dolina Białego (The Valley of the White)

Punkt	Stężenie radonu		Moc dawki [nSv/h]	Temperatura powietrza [°C]	Ciśnienie atmosferyczne [hPa]	Wilgotność względna powietrza [%]
	AlphaGUARD [Bq/m ³]	Komory Lucasa [Bq/m ³]				
Sztolnia SU-1						
P1	5100 ± 260	2140 ± 70	90	7.0	901.9	72
P1A	–	2600 ± 60	230	–	–	–
P2	6100 ± 430	2900 ± 60	90	8.0	901.0	72.6
P3	4230 ± 210	1500 ± 60	70	5.7	901.1	82
P4	610 ± 210	300 ± 30	40	6.5	900.0	84.5
P5	670 ± 131	300 ± 30	–	6.9	900.0	96.9
Sztolnia SU-2						
S1	2860 ± 150	2700 ± 60	1332	7.9	899.4	87
S1A	–	–	800	–	–	–
S2	2740 ± 230	2550 ± 60	144	6.5	900.0	75.3
S3	28 160 ± 1460	21 400 ± 200	4555	6.3	900.0	83.8
S4	15 530 ± 1240	13 000 ± 190	5616	5.9	900.0	87.5
S5	12 720 ± 630	13 000 ± 180	339	6.2	899.3	94
S6	12 540 ± 660	11 500 ± 170	111	5.8	899.2	96
S7	4270 ± 760	2140 ± 50	61	5.6	900.0	89.2



Ryc. 3. Punkt o maksymalnej wartości mocy dawki w sztolni SU-2

Fig. 3. Maximum value of gamma dose rate in SU-2 uranium mine

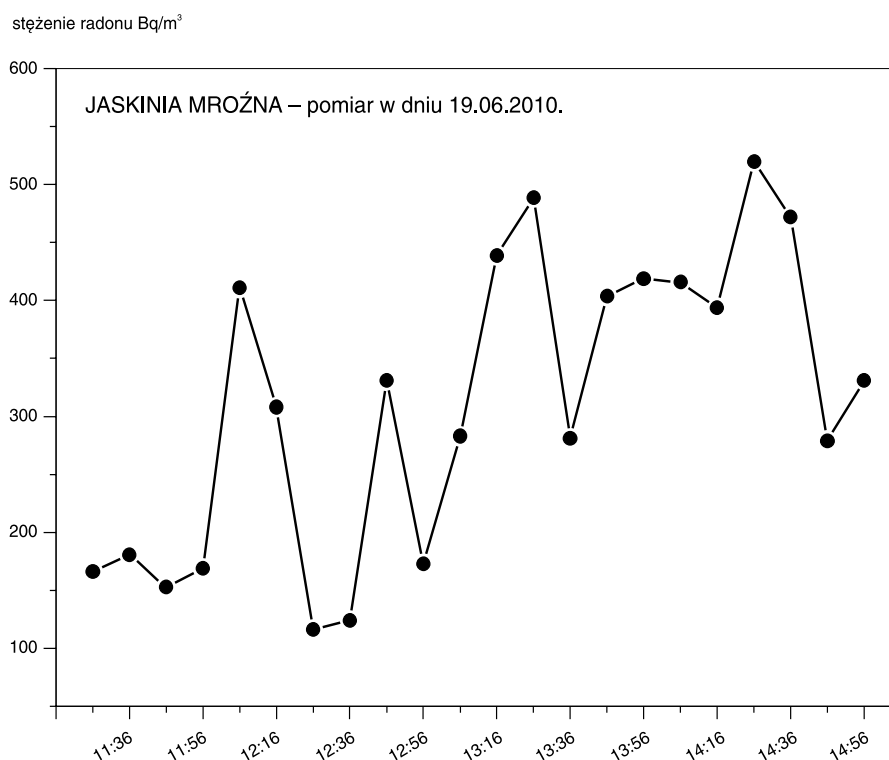
i komory Lucasa – pomiar chwilowy) wykazują dobrą zgodność. Większe rozbieżności pomiędzy tymi metodami zaobserwowano w sztolni SU-1. Może to być efektem lepszej wentylacji sztolni z uwagi na mniejszą długość i prostszy układ korytarzy.

Zmierzono stężenie radonu w wodzie zalegającej na dnie sztolni. Wyższe wartości zaobserwowano w sztolni SU-2: od 19,4 Bq/l do 26,5 Bq/l. W sztolni SU-1 wartości stężeń radonu w wodzie zawierały się w granicach od 15,2 Bq/l do 25,4 Bq/l, zaś w strumieniu wypływającym z tej sztolni stężenie radonu wynosiło 1,9 Bq/l. Dla porów-

nania zmierzono stężenie radonu w Białym Potoku w pobliżu wejścia do sztolni SU-1, które wynosiło 0,2 Bq/l.

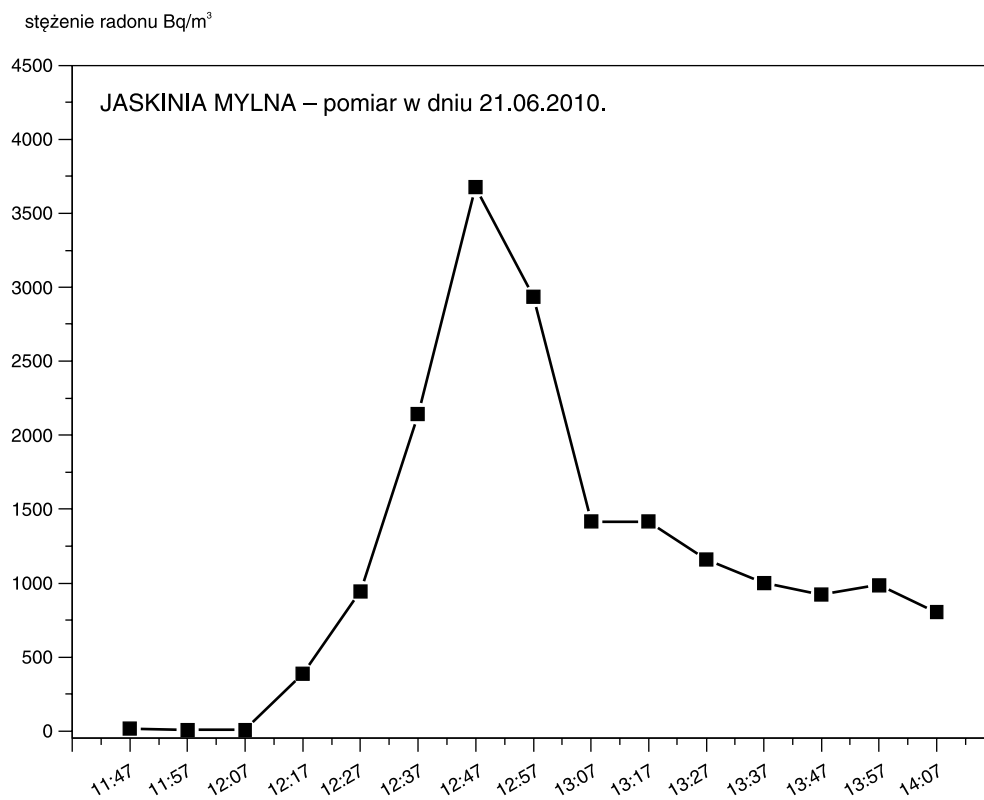
Wykonane pomiary stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych w próbkach materiału skalnego ze sztolni SU-2 wykazują bardzo wysokie stężenia Ra-226 pochodzącego z szeregu uranowego (U-238). Maksymalne zmierzone stężenie Ra-226 w jednej z próbek z punktu S-3 wynosi 1200 ± 70 Bq/kg. Stężenia potasu zawierają się w granicach od 20 do 500 Bq/kg a stężenia toru są bardzo niskie (< 20 Bq/kg).

W jaskiniach Mrożnej i Mylnej (Dolina Kościeliska) prowadzono ciągły pomiar stężenia radonu z rejestracją co 10 minut za pomocą miernika RTM1688-2. Pomiary trwały ok. 2–3 godziny w trakcie przejścia przez całe długości jaskiń. Jaskinia Mrożna, o łącznej długości ok. 570 m, znajduje się w stoku Żlebu Pod Wysranki, a Jaskinia Mylna to jedna z najciekawszych polskich jaskiń turystycznych w stoku pod Raptawicką Turnią przeznaczona do samodzielnego zwiedzania bez przewodnika o długości trasy oznakowanej ok. 300 m (Grodzicki, 1993; Parma, Rajwa, 1978). Przebieg zmian stężenia radonu w obu jaskiniach pokazano na rycinie 4 (Jaskinia Mrożna) i na rycinie 5 (Jaskinia Mylna). Średnie stężenie radonu w Jaskini Mrożnej wynosi 310 Bq/m³ i zmienia się w zakresie od 116 Bq/m³ do 520 Bq/m³. Odmienna sytuacja panowała w Jaskini Mylnej, gdzie zmienność stężenia radonu była znacznie większa: od ok. 10 Bq/m³ do wartości maksymalnej 3680 Bq/m³, która została zarejestrowana w punkcie za pierwszym wąskim przejściem na trasie turystycznej.



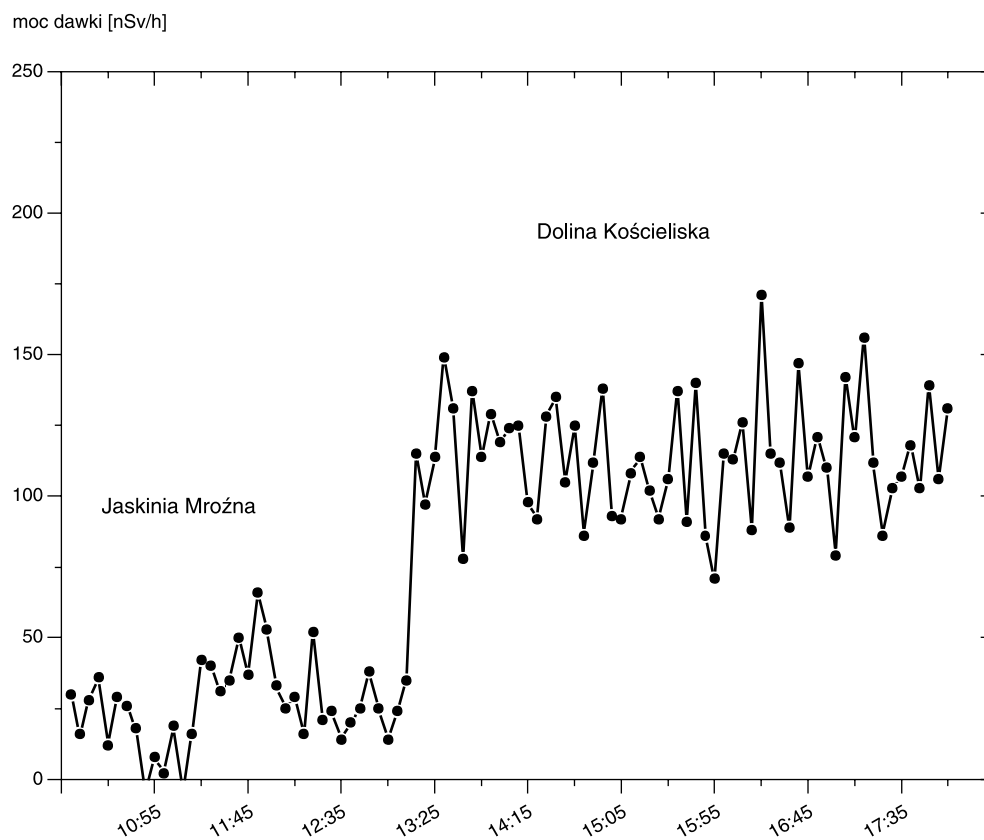
Ryc. 4. Stężenie radonu w Jaskini Mrożnej (Dolina Kościeliska)

Fig. 4. Radon concentration in Mroźna Cave (Koscieliska Valley)



Ryc. 5. Stężenie radonu w Jaskini Mylnej (Dolina Kościeliska)

Fig. 5. Radon concentration in Mylna Cave (Koscieliska Valley)



Ryc. 6. Moc dawki promieniowania gamma w jaskini Mroźnej i w Dolinie Kościeliskiej

Fig. 6. Gamma dose rate measured in Mroźna Cave and in Koscieliska Valley

W Jaskini Mroźnej przeprowadzono także ciągły pomiar mocy dawki promieniowania gamma (ryc. 5). Widać wyraźne obniżenie wartości mocy dawki (średnia wartość 40 nSv/h) wewnątrz jaskini w stosunku do mocy dawki rejestrowanej w czasie przejścia przez Dolinę Kościeliską (ok. 100 nSv/h). Świadczy to o niskiej zawartości naturalnych izotopów gamma promieniotwórczych w ścianach jaskini w porównaniu ze ścianami starych sztolni uranowych w Dolinie Białego.

Podsumowanie

Przedstawione w pracy wyniki badania poziomów naturalnej promieniotwórczości w Tatrach dotyczą jedynie niewielkiego fragmentu terenu TPN. Dalsze i dokładniejsze badania w tym zakresie wydają się celowe i interesujące. Rozpoznanie rozkładu przestrzennego naturalnych izotopów promieniotwórczych, w tym gazowego radonu, które są ściśle powiązane ze strukturą geologiczną obszaru Tatr, byłoby cennym uzupełnieniem wiedzy naukowej o tym rejonie.

Podziękowania

Autorzy dziękują Dyrekcji i Pracownikom Tatrzańskiego Parku Narodowego za umożliwienie przeprowadzenia pomiarów i dużą pomoc merytoryczną i techniczną w czasie ich wykonywania.

Pomiary wykonywano w ramach projektu międzynarodowego niewspółfinansowanego „Określenie sytuacji radiologicznej na obszarach o podwyższonym tle promieniowania naturalnego w Słowenii i w Polsce”.

Natural radioactivity in old uranium mines (The Valley of the White) and in Mylna and Mroźna Caves (Koscieliska Valley)

Natural radioactivity is one of the essential components of the environment. Thus it is important to investigate the radiological situation in the Tatra mountains in order to complete the general knowledge about this region. Unlike the Sudety area, the Tatra mountains were not the subject of wide survey as regards the levels of natural radioactivity. Especially the concentrations of radon (natural gaseous radioactive isotope) have not been investigated there. Radon is responsible for about half of the annual dose that population receive from natural sources and therefore it is very important from radiological protection point of view.

Within the frame of bilateral cooperation between Institute of Nuclear Physics PAN in Krakow and Jozef

Stefan Institute in Ljubljana (Slovenia), the measurements of natural radioactive elements in some places in the Tatra National Park (Poland) were performed in June 2010. The investigated sites were located in Dolina Białego Valley (two old uranium mines) and in Koscieliska Valley (Mroźna Cave and Mylna Cave). The concentrations of radon and natural radioactive elements (potassium K-40, radium Ra-226, thorium Th-232) were measured as well as gamma dose rate. The concentration of radon in water was also determined in old uranium mines

Literatura

- Grodzicki J., 1993. Jaskinia Mylna, [w:] Grodzicki J. (red.), Jaskinie Tatrzańskiego Parku Narodowego. Jaskinie zachodniego zbocza Doliny Kościeliskiej, t. 2, PTPNoZ, Warszawa.
- Kłosowski M., Kozak K., Mazur J., Olko P., Kubica B., Skawiński P., Cebulska-Wasilewska A., 2010. Comparison of the Radiation Level Measured by Physical Dosimeters Located in the Tatra Mountains and at the Control Sites, NATO Science Series Book “Rapid Diagnosis of a Population in an Emergency and at Risk after Exposure to Ionizing Radiation and Chemicals” (w druku).
- Kubica B., Skiba S., Gołaś J., Stobiński M., 2006. Zawartość radionuklidu ^{137}Cs w glebach i roślinach Tatr, Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek, tom III: Człowiek i środowisko, TPN na tle innych górskich terenów chronionych (TPN, Zakopane), ISBN: 83-85832-96-3, s. 55.
- Kubica B., Skiba S., Drewnik M., Stobiński M., Kubica M., Gołaś J., Misiak R., 2010. Radionuclides ^{137}Cs and ^{40}K in the solids of the Tatra National Park (TPN, Poland), Nukleonika, 55, s. 377.
- Parma Ch., Rajwa A., 1978. Turystyczne Jaskinie Tatr, Sport i Turystyka, Warszawa.
- Radiologiczny Atlas Polski 2005. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 2006.
- Raport PAA, 2010. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2009 roku, Państwowa Agencja Atomistyki Warszawa 2010. (<http://www.paa.gov.pl/dokumenty/atomistyka2009.pdf>).
- Szot Z., 1993. Rad i radon w środowisku oraz skutki ich wniknięcia do organizmu człowieka, Postępy Techniki Jądrowej, Vol. 36, Z. 1–2.
- Vaupotič J., Gregorič A., Kobal I., Žvab P., Kozak K., Mazur J., Kochowska E., Grządziel D., 2010. Radon concentration in soil gas and radon exhalation rate at the Ravne Fault in NW Slovenia, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, s. 895–899.

