

Prądnik. Prace Muz. Szafera	32	9–24	2022
-----------------------------	----	------	------

OLGA STAWARZ*, KRZYSZTOF ISAJENKO,
BARBARA PIOTROWSKA

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej
ul. Konwaliowa 7, 03-194 Warszawa
*e-mail: stawarz@clor.waw.pl

PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ GLEB OJCOWSKIEGO PARKU NARODOWEGO

Soil radioactivity in Ojców National Park

Abstract. This work presents the results of the determination of caesium ^{137}Cs deposition and concentrations of potassium ^{40}K , radium ^{226}Ra and actinium ^{228}Ac in soil samples collected in Ojców National Park by CLOR. Concentration measurements were taken by gamma radiation spectrometry using a spectrometric track with a coaxial HPGe detector. Exposure of people to ionizing radiation in Ojców National Park was estimated on the basis of natural radionuclide concentrations in soil samples. In addition, the obtained determinations of caesium deposition and concentrations of natural radionuclides in the soil were compared with the results of research conducted by CLOR in several other National Parks in our country and also for Poland and Małopolskie Voivodeship (CLOR radiological monitoring carried out cyclically since 1988, study for the Chief Inspectorate of Environmental Protection).

Key words: soil radioactivity, Ojcowski National Park, gamma spectrometry, ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ac , Chernobyl NPP

WSTĘP

Ojcowski Park Narodowy (OPN) został utworzony 14 stycznia 1956 r. Położony jest w województwie małopolskim, na Wyżynie Olkuskiej, znajdującej się w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. Ten najmniejszy z polskich parków narodowych ma powierzchnię 21,46 km², a obszar strefy ochronnej zwanej otuliną wynosi 67,77 km². Lasy stanowią 71% terenu OPN, grunty rolne (w tym łąki i pastwiska) – 22%, a wody – 1% (www.ojcowskiparknarodowy.pl).

Na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego występują jurajskie wapienie skaliste i wapienie ławicowe z krzemieniami, a największą powierzchnię zajmują czwartorzędowe lessy. Pokrywają one większą część wierzchowiny oraz zbocza dolin. Dno doliny Prądnika i Sąspówki wypełniają żwiry, piaski i gliny, natomiast boczne dolinki i wąwozy - osady lessopochodne. Na zwietrzelinie wapieni wytworzyły się różne podtypy rędzin. Obszary lessowe stanowią podłoże dla gleb płowych i brunatnych. Skład granulometryczny lessu to w przeważającej mierze pyły gliniaste i pyły ilaste (Zalewa, 2008). Przy tak zróżnicowa-

nej budowie geologicznej tego obszaru wydaje się interesujące badanie gleb pod kątem obecności pierwiastków promieniotwórczych. Praca jest kontynuacją prowadzonych przez Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej pomiarów próbek gleby pobranych w Kampinoskim, Poleskim, Świętokrzyskim i Narwiańskim Parku Narodowym.

Podstawowym celem badań była ocena sytuacji radiacyjnej na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego na podstawie wyników pomiarów promieniotwórczości gleby pochodzącej z tego regionu. W pobranych próbkach gleby oznaczono metodą wysokorozdzielczej spektrometrii promieniowania gamma stężenia radionuklidów naturalnych: potasu ^{40}K , radu ^{226}Ra i aktynu ^{228}Ac oraz depozycję (stężenie powierzchniowe) radionuklidu pochodzenia sztucznego – cezu ^{137}Cs . Stężenia radionuklidów naturalnych przyjmują zróżnicowane wartości w zależności od budowy geologicznej danego regionu. Poza tym są to izotopy długożyciowe i ich zawartość w glebie zmienia się nieznacznie na przestrzeni lat. Natomiast cez ^{137}Cs powstał w wyniku działalności człowieka, stąd jego rozkład w glebie na terenie Polski jest nierównomierny. Główną przyczyną pojawienia się cezu w środowisku naszego kraju była awaria Elektrowni Jądrowej w Czarnobylu w kwietniu 1986 r. Mniejsze znaczenie miały też wcześniejsze próbne wybuchy jądrowe na świecie. Cez, który dotarł do Polski po awarii w Czarnobylu, skumulował się w wierzchniej warstwie gleby w rejonach, gdzie spadł deszcz podczas przemieszczania się chmury radioaktywnej. Najwyższe stężenia tego radionuklidu odnotowywane są od tego czasu do chwili obecnej dla woj. opolskiego i dolnośląskiego, nieco niższe dla woj. śląskiego, małopolskiego i mazowieckiego. Okres połowicznego rozpadu ^{137}Cs wynosi ponad 30 lat, dlatego jest on wciąż obecny w glebie. Cez rozpada się zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego, jak również częściowo wnika w głębsze warstwy lub przechodzi korzeniami do roślin, czy przez grzybnię do owocników grzybów. Ze względu na specyfikę środowiska leśnego oraz cechy gatunkowe radionuklid ten najchętniej kumuluje się w podgrzybkach brunatnych (*Xerocomus badius*) (Grabowski i in., 1999; Isajenko i in., 2017).

Narażenie ludzi przebywających na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego na promieniowanie jonizujące zostało oszacowane na podstawie wyników pomiarów stężeń radionuklidów naturalnych w próbkach gleby.

Dodatkowo otrzymane wyniki określenia depozycji ^{137}Cs i stężeń ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ac w glebie porównano z rezultatami badań prowadzonych przez CLOR w kilku innych parkach narodowych na terenie naszego kraju oraz dla Polski i woj. małopolskiego (monitoring radiologiczny prowadzony od 1988 r. przez CLOR dla Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska).

POBÓR PRÓBEK

W sierpniu 2021 roku pracownicy Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej pobrali z terenu Ojcowskiego Parku Narodowego szesnaście próbek gleby. Były to różne podtypy rędzin, gleb brunatnych i pływych, dość zwarte, gliniaste lub mieszane, co dało się łatwo zauważyć w ich profilach.

Próbki zostały pobrane z powierzchniowej warstwy gleby (10 cm), zgodnie z procedurą zalecaną przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu (Przewodnik IAEA, 1989). W każdym punkcie pobrano za pomocą metalowego wykrojnika jedną próbkę, składającą się z siedmiu walców (wysokość 10 cm, średnica 6,9 cm). Jedną część (pobrana przez jeden wykrojnik) znajdowała się w środku, a sześć na obwodzie koła o promieniu 1 m (schemat poboru przedstawiono na ryc. 1.). W każdym punkcie poboru

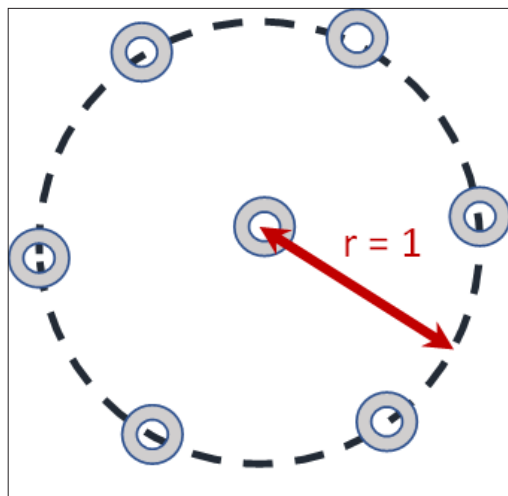
zsypano do worka siedem porcji gleby i opisano próbkę (numer i nazwa punktu oraz data poboru).

Nazwy miejsc poboru próbek i ich współrzędne geograficzne zebrano w tabeli 1.

Na mapie znajdującej się na ryc. 2. przedstawiono rozmieszczenie punktów poboru próbek gleby na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego.

PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Pobrane próbki gleby zostały przewiezione do Zakładu Dozymetrii CLOR i odpowiednio przygotowane do pomiaru. W pierwszej kolejności wysypano je na blachy, oczyszczono, wstępnie rozdrobniono i opisano. Następnie gleby suszono w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 105°C przez minimum 24 godziny i studzono do temperatury pokojowej. Po wyznaczeniu masy całkowitej próbki rozdrobniono i przesypano do pojemników pomiarowych typu Marinelli (objętość 0,5 dm³) przez atestowane sito o średnicy oczek 2 mm. Objętość każdej próbki wyniosła 0,45 dm³. Następnie wyznaczono masę netto próbek, szczelnie zamknięto pojemniki pomiarowe, zaklejono je taśmą izolacyjną i opisano w celu identyfikacji. Tak przygotowane próbki leżały minimum miesiąc do momentu wykonania pomiarów. Zakres masy całkowitej próbek wynosił od 2115 g do 3430 g, natomiast masa netto próbek w pojemnikach pomiarowych mieściła się w zakresie od 440 g do 555 g. Wartość średnia gęstości próbek przygotowanych do pomiaru to 1,1 g/cm³.



Ryc. 1. Schemat poboru próbki gleby z jednego punktu

Fig. 1. Scheme of taking a soil sample from one point

METODA POMIARU

Stężenia izotopów gamma promieniotwórczych w próbkach gleby zostały zmierzone metodą wysokorozdzielczej spektrometrii promieniowania gamma za pomocą toru spektrometrycznego z detektorem koaksjalnym HPGe o wydajności względnej 25% i rozdzielczości 1,8 keV dla ⁶⁰Co (E = 1332 keV). Napięcie pracy detektora wynosiło U_p = 4000 V, a czas pomiaru każdej próbki – 80 000 s.

Pomieszczenie, w którym wykonywane są pomiary spektrometryczne znajduje się w specjalnym budynku (tzw. „bunkrze”), w części zwanej Laboratorium Pomiarów Niskotłowych. Detektor umieszczony jest w domku osłonnym złożonym z trzech warstw: zewnętrznej – 100 mm Pb, środkowej – 1 mm Cd i wewnętrznej – 2 mm Cu. Domek taki pochłania również rentgenowskie promieniowanie charakterystyczne wzbudzone w jego

Tabela 1. Lokalizacja punktów poboru próbek gleby z terenu OPN

Table 1. Location of soil sampling points in the ONP area

Nr pkt. Point no.	Miejsce poboru próbki Sampling site	Długość geogr. E Longitude E	Szerokość geogr. N Latitude N	Nr pkt. Point no.	Miejsce poboru próbki Sampling site	Długość geogr. E Longitude E	Szerokość geogr. N Latitude N
1	Pieskowa Skała	19,7828	50,2429	9	Długa Skała – Buk Szafera	19,8166	50,1866
2	Mokrzys	19,7847	50,2447	10	Czajowice	19,8176	50,2001
3	Słoneczna Góra	19,8153	50,2391	11	Dąbrówka	19,7859	50,2045
4	Prądnik – Źródło Młynnik	19,7951	50,2397	12	Zabugaje – Poręba	19,7940	50,2188
5	Grodzisko	19,8262	50,2288	13	Dolina Sąspowska	19,8070	50,2118
6	Ojców	19,8287	50,2096	14	Kolencin	19,8121	50,2178
7	Ojców – Źródło Miłości	19,8300	50,1958	15	Smardzowice	19,8656	50,1932
8	Prądnik Cza- jowski	19,8398	50,1827	16	Enklawa OPN w Hamernii	19,8651	50,1564

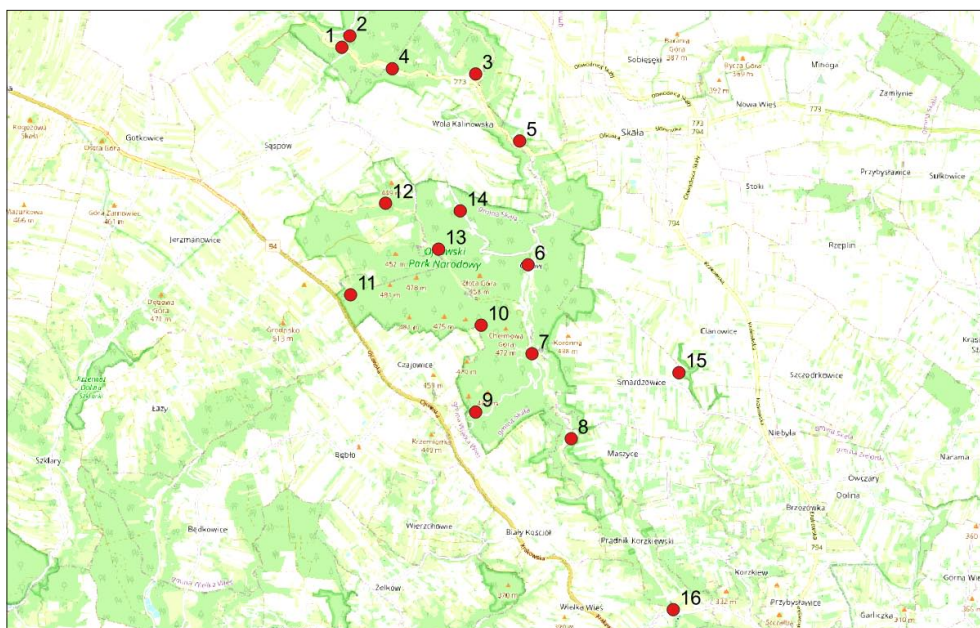
materiale oraz miękką składową promieniowania kosmicznego. Progi wykrywalności zastosowanej metody wynoszą: 0,15 Bq/kg dla ^{137}Cs ; 2,5 Bq/kg dla ^{40}K ; 2,0 Bq/kg dla ^{226}Ra i 0,5 Bq/kg dla ^{228}Ac .

Do kalibracji toru spektrometrycznego zastosowano źródło objętościowe multigamma nr 49/21. Jest to mieszanina następujących radionuklidów: ^{241}Am ($E = 59,5$ keV), ^{109}Cd (88,0 keV), ^{57}Co (122,1 keV i 136,5 keV), ^{51}Cr (320,1 keV), ^{113}Sn (391,7 keV), ^{85}Sr (514,0 keV), ^{137}Cs (661,7 keV), ^{54}Mn (834,8 keV), ^{88}Y (898,0 keV i 1836,1 keV), ^{65}Zn (1115,5 keV) i ^{60}Co (1173,2 keV i 1332,5 keV). Źródło znajduje się w naczyniu Marinelli o objętości 0,5 dm³ i ma gęstość odpowiadającą wartości średniej gęstości przygotowanych próbek gleby (1,1 g/cm³). Zostało ono wykonane przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych - Ośrodek Radioizotopów POLATOM w Świerku.

WYNIKI POMIARÓW

Dla każdej zmierzonej próbki przeanalizowano otrzymane widmo promieniowania gamma w zakresie energii od 30 keV do 2000 keV. Analiza i obliczenia zostały przeprowadzone za pomocą programu Genie2000, z uwzględnieniem odpowiedniej kalibracji oraz tła zmierzonego wcześniej w pustym, zamkniętym domku osłonowym.

Oznaczono wartości stężeń i niepewności cezu ^{137}Cs (radionuklid pochodzenia sztucznego) oraz radionuklidów naturalnych: potasu ^{40}K , radu ^{226}Ra i aktynu ^{228}Ac , wyrażone w Bq/kg. Niepewność została określona dla $k=1$.



Ryc. 2. Punkty poboru próbek gleby na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego

Fig. 2. Soil sampling points in Ojców National Park

W przypadku cezu ^{137}Cs przeliczono stężenie wyrażone w Bq/kg na depozycję (stężenie powierzchniowe), wyrażoną w kBq/m², korzystając z poniższego wzoru:

$$Dep \left[\frac{\text{kBq}}{\text{m}^2} \right] = \frac{S \left[\frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]}{1000} \times \frac{M \text{ [kg]}}{7 \times P \text{ [m}^2\text{]}} = \frac{S \times M}{1750 \times \pi \times D^2} \left[\frac{\text{kBq}}{\text{m}^2} \right]$$

gdzie: S [Bq/kg] – stężenie radionuklidu w badanej próbce, M [kg] – masa całkowita pobranej próbki, P = $(\pi \times D^2)/4$ [m²] – pole powierzchni, z której pobierana jest gleba za pomocą wykrojnika o średnicy D.

W tab. 2. zebrano obliczone wartości depozycji cezu ^{137}Cs w próbkach gleby pochodzących z obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego.

Na wykresie znajdującym się na ryc. 3. przedstawiono rosnąco wartości depozycji cezu ^{137}Cs w poszczególnych próbkach gleby z OPN oraz dla porównania zaznaczono wartości średnie depozycji cezu dla Polski i dla woj. małopolskiego, otrzymane na podstawie badania próbek gleby pobranych jesienią 2020 r. w ramach monitoringu radiologicznego CLOR dla GIOŚ (Isajenko i in., 2022).

Wartość średnia depozycji ^{137}Cs w glebie pobranej z obszaru OPN wynosi $5,32 \pm 0,81$ kBq/m². Najniższą wartość depozycji, wynoszącą $1,14 \pm 0,03$ kBq/m² określono dla punktu nr 8 (Prądnik Czajowski), zaś najwyższą, równą $11,92 \pm 0,25$ kBq/m², dla punktu nr 14

Tabela 2. Depozycja cezu ^{137}Cs w próbkach gleby pobranych na terenie OPN
 Table 2. Deposition of caesium ^{137}Cs in soil samples collected in the ONP area

Nr pkt. Point no.	Miejsce poboru próbki Sampling site	Depozycja ^{137}Cs [kBq/m ²] Deposition of ^{137}Cs [kBq/m ²]	Nr pkt. Point no.	Miejsce poboru próbki Sampling site	Depozycja ^{137}Cs [kBq/m ²] Deposition of ^{137}Cs [kBq/m ²]
1	Pieskowa Skała	3,12 ± 0,07	9	Długa Skała – Buk Szafera	9,87 ± 0,20
2	Mokrzys	2,69 ± 0,06	10	Czajowice	4,88 ± 0,10
3	Słoneczna Góra	5,98 ± 0,12	11	Dąbrówka	11,42 ± 0,24
4	Prądnik – Źródło Młynnik	4,98 ± 0,10	12	Zabugaje – Poręba	5,54 ± 0,12
5	Grodzisko	2,81 ± 0,06	13	Dolina Sąspowska	4,77 ± 0,10
6	Ojców	3,03 ± 0,07	14	Kolencin	11,92 ± 0,25
7	Ojców – Źródło Miłości	6,57 ± 0,14	15	Smardzowice	4,56 ± 0,10
8	Prądnik Czajowski	1,14 ± 0,03	16	Enklawa OPN w Hamernii	1,84 ± 0,04

(Kolencin). Wszystkie wartości stężenia powierzchniowego cezu są wyższe niż wartość średnia dla Polski. Oprócz wyniku uzyskanego dla punktu 8 wszystkie wartości depozycji są także wyższe niż wartość średnia dla woj. małopolskiego.

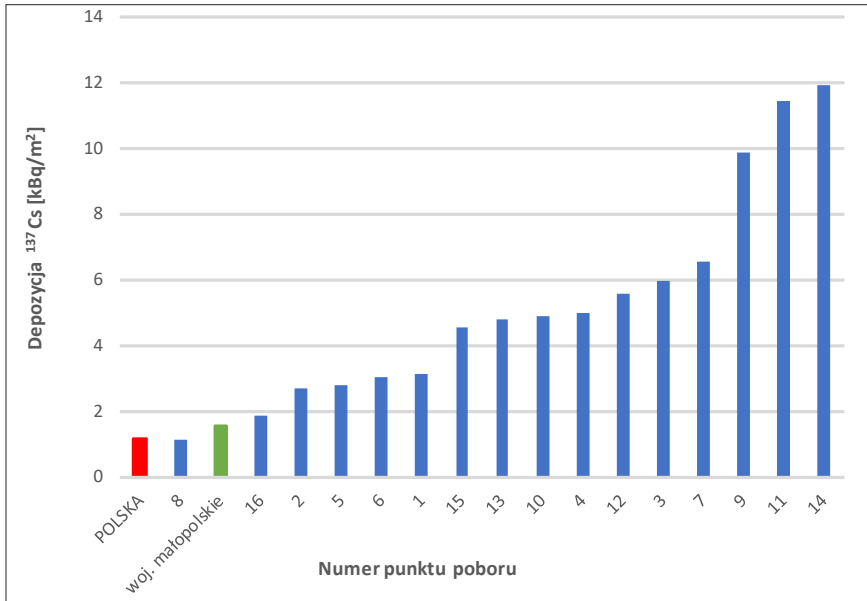
Wartości stężeń radionuklidów naturalnych ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ac w próbkach gleby pobranych w Ojcowskim Parku Narodowym zestawiono w tab. 3.

Wykresy przedstawiające wartości stężeń radionuklidów naturalnych ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ac w glebie w poszczególnych punktach poboru na terenie OPN znajdują się na ryc. 4. – ryc. 6. Podobnie jak w przypadku cezu, porównano te rezultaty z wartościami średnimi stężeń dla Polski i woj. małopolskiego (Isajenko i in., 2022).

Wartość średnia stężenia ^{40}K w glebie pobranej z obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego wynosi 491 ± 18 Bq/kg. Najniższe stężenie potasu określono dla punktu nr 7 – Ojców – Źródło Miłości (267 ± 7 Bq/kg), a najwyższe dla punktu nr 16 – Enklawa OPN w Hamernii (562 ± 15 Bq/kg). Wartości stężenia potasu w glebie z OPN są porównywalne ze średnią dla woj. małopolskiego i w większości punktów wyższe niż średnia dla Polski.

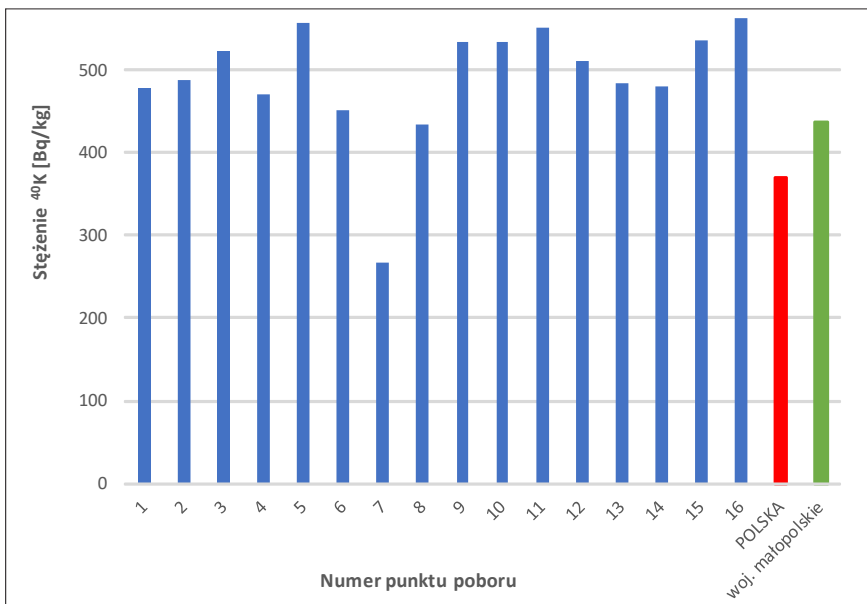
Dla gleby pobranej z terenu OPN wartość średnia stężenia ^{226}Ra wynosi $36,5 \pm 1,2$ Bq/kg. Najniższe stężenie radu określono dla punktu nr 7 – Ojców – Źródło Miłości ($27,3 \pm 1,8$ Bq/kg), zaś najwyższe dla punktu nr 9 – Długa Skała – Buk Szafera ($43,1 \pm 2,8$ Bq/kg). Wartości stężenia radu w glebie z Ojcowskiego Parku Narodowego są wyższe od wartości średniej dla Polski i porównywalne ze średnią dla woj. małopolskiego.

Wartość średnia stężenia ^{228}Ac w glebie pobranej z obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego wynosi $35,8 \pm 1,4$ Bq/kg. Najniższe stężenie aktynu oznaczono w punkcie nr 7 – Ojców – Źródło Miłości ($21,8 \pm 0,6$ Bq/kg), a najwyższe w punkcie nr 13 – Dolina



Ryc. 3. Depozycja ^{137}Cs w glebie pobranej z terenu OPN oraz wartość średnia dla Polski i woj. małopolskiego

Fig. 3. Deposition of ^{137}Cs in the soil collected from the ONP area and the mean values for Poland and Małopolskie Voivodeship. Horizontal axis: Sampling point number; vertical axis: Deposition of ^{137}Cs [kBq/m²]



Ryc. 4. Stężenie ^{40}K w glebie pobranej z terenu OPN oraz wartość średnia dla Polski i woj. małopolskiego.

Fig. 4. Concentration of ^{40}K in the soil taken from the ONP area and the mean values for Poland and Małopolskie Voivodeship. Horizontal axis: Sampling point number; vertical axis: Concentration of ^{40}K [Bq/kg]

Tabela 3. Stężenie radionuklidów naturalnych w próbkach gleby pobranych na terenie OPN
 Table 3. Concentration of natural radionuclides in soil samples collected in the ONP area

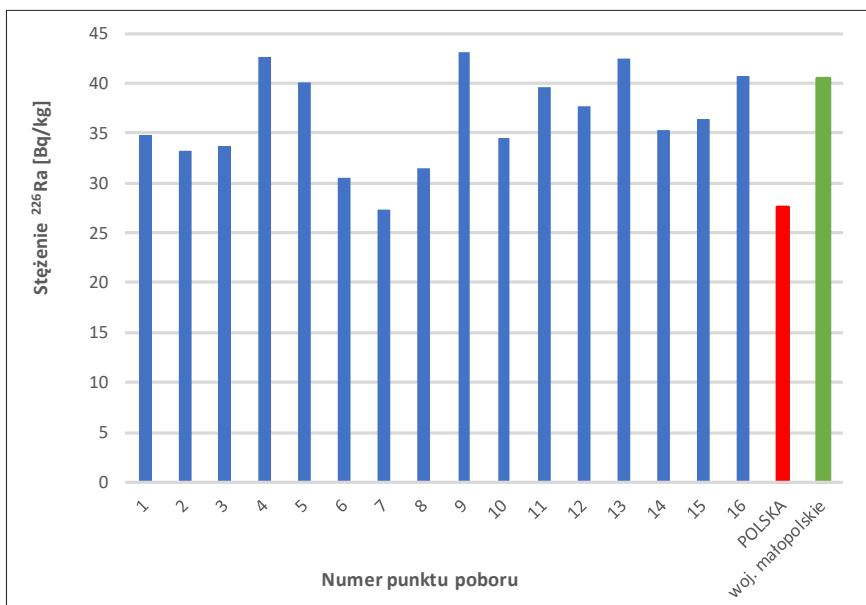
Nr pkt. Point no.	Miejsce poboru próbki Sampling site	Stężenie [Bq/kg] Concentration of radionuclide [Bq/kg]		
		⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²²⁸ Ac
1	Pieskowa Skała	478 ± 12	34,9 ± 2,2	38,9 ± 1,0
2	Mokrzys	488 ± 13	33,3 ± 2,2	32,7 ± 0,8
3	Słoneczna Góra	523 ± 14	33,7 ± 2,2	33,7 ± 0,9
4	Prądnik – Źródło Młynnik	470 ± 12	42,7 ± 2,7	42,5 ± 1,1
5	Grodzisko	557 ± 14	40,1 ± 2,5	39,7 ± 1,0
6	Ojców	452 ± 12	30,6 ± 2,0	29,6 ± 0,8
7	Ojców – Źródło Miłości	267 ± 7	27,3 ± 1,8	21,8 ± 0,6
8	Prądnik Czajowski	434 ± 11	31,5 ± 2,0	30,7 ± 0,8
9	Długa Skała – Buk Szafera	533 ± 14	43,1 ± 2,8	38,6 ± 1,0
10	Czajowice	533 ± 14	34,6 ± 2,2	33,8 ± 0,9
11	Dąbrówka	552 ± 14	39,7 ± 2,5	36,8 ± 0,9
12	Zabugaje – Poręba	511 ± 13	37,7 ± 2,4	38,1 ± 1,0
13	Dolina Sąspowska	484 ± 13	42,5 ± 2,7	43,9 ± 1,1
14	Kolencin	480 ± 13	35,3 ± 2,4	32,5 ± 0,9
15	Smardzowice	536 ± 14	36,5 ± 2,4	36,6 ± 1,0
16	Enklawa OPN w Hamernii	562 ± 15	40,8 ± 2,6	42,3 ± 1,1

Sąspowska ($43,9 \pm 1,1$ Bq/kg). Otrzymane stężenia aktynu w glebie pochodzącej z OPN są porównywalne z wartością średnią dla woj. małopolskiego i wyższe niż średnia dla Polski.

Podsumowując uzyskane wyniki, zebrano wartości średnie oraz zakresy depozycji ¹³⁷Cs i stężeń radionuklidów naturalnych w glebie OPN, a także – dla porównania – wyniki pomiarów gleby dla Polski i woj. małopolskiego. Dane te zawarte są w tab. 4.

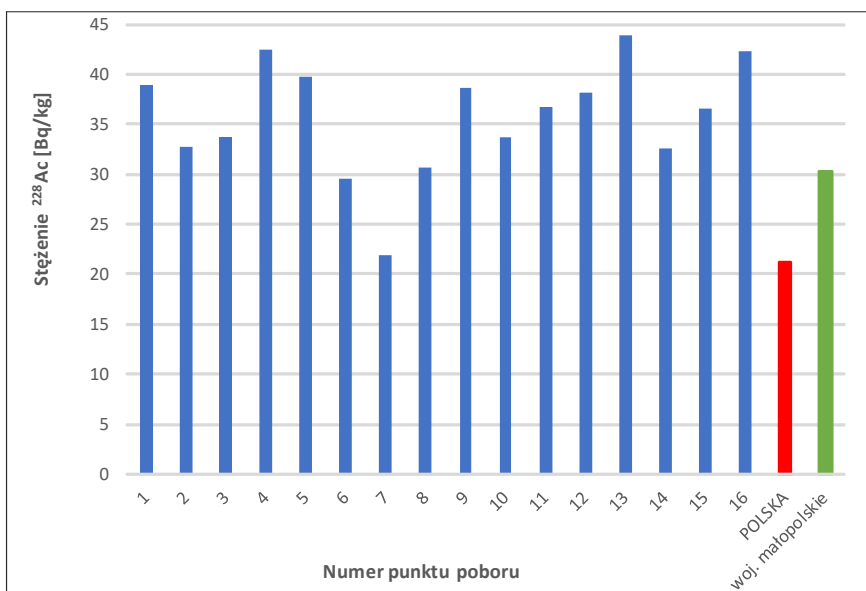
Wartość średnia depozycji ¹³⁷Cs w glebie Ojcowskiego Parku Narodowego jest wyższa od wartości średniej zarówno dla Polski, jak i dla woj. małopolskiego. Wartości średnie stężeń naturalnych radionuklidów w glebie OPN są wyższe niż wartości średnie dla Polski i dla woj. małopolskiego. Wyjątek stanowi rad ²²⁶Ra, dla którego wartość średnia stężenia jest najwyższa dla woj. małopolskiego.

Wartość maksymalna depozycji ¹³⁷Cs w glebie OPN jest niższa niż dla Polski, ale wyższa niż dla woj. małopolskiego. Analizując dane zamieszczone w tab. 4. oraz wykres na ryc. 3. można także zauważyć, że depozycja cezu w glebie jest wyższa w czterech punktach poboru na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego od wartości maksymalnej określonej dla woj. małopolskiego. Maksymalne stężenia radionuklidów naturalnych są niższe dla gleb pochodzących z OPN niż dla Polski i woj. małopolskiego.



Ryc. 5. Stężenie ^{226}Ra w glebie pobranej z terenu OPN oraz wartość średnia dla Polski i woj. małopolskiego

Fig. 5. Concentration of ^{226}Ra in the soil taken from the ONP area and the mean values for Poland and Małopolskie Voivodeship. Horizontal axis: Sampling point number; vertical axis: Concentration of ^{226}Ra [Bq/kg]



Ryc. 6. Stężenie ^{228}Ac w glebie pobranej z terenu OPN oraz wartość średnia dla Polski i woj. małopolskiego

Fig. 6. Concentration of ^{228}Ac in the soil taken from the ONP area and the mean values for Poland and Małopolskie Voivodeship. Horizontal axis: Sampling point number; vertical axis: Concentration of ^{228}Ac [Bq/kg]

Tabela 4. Porównanie wartości średnich i zakresów depozycji ^{137}Cs oraz stężeń ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ac dla próbek gleby pochodzących z OPN oraz dla Polski i woj. małopolskiego

Table 4. Comparison of mean values and ranges of ^{137}Cs deposition and ^{40}K , ^{226}Ra and ^{228}Ac concentrations for soil samples from ONP and for Poland and Małopolskie Voivodeship

Lokalizacja Location	Średnia depozycja (zakres) ^{137}Cs [kBq/m ²] Mean value of ^{137}Cs deposition (range) [kBq/m ²]	Średnie stężenie (zakres) [Bq/kg] Mean value of radionuclide concentration (range) [Bq/kg]		
		^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ac
Ojcowski Park Narodowy	5,32 ± 0,81 (1,14 – 11,92)	491 ± 18 (267 – 562)	36,5 ± 1,2 (27,3 – 43,1)	35,8 ± 1,4 (21,8 – 43,9)
POLSKA	1,13 ± 0,10 (<0,01 – 16,27)	369 ± 9 (46 – 906)	27,6 ± 1,1 (4,0 – 126,3)	21,2 ± 0,8 (2,5 – 93,6)
woj. małopolskie	1,52 ± 0,21 (0,27 – 6,15)	437 ± 17 (182 – 692)	40,5 ± 2,5 (12,6 – 126,0)	30,3 ± 1,1 (9,2 – 54,5)

Tabela 5. Wartości rocznej dawki efektywnej w poszczególnych punktach poboru gleby w OPN

Table 5. Annual effective dose values at individual soil sampling points in ONP

Nr pkt. Point no.	Miejsce poboru próbki Sampling site	Dawka efektywna [mSv/rok] Effective dose [mSv/y]	Nr pkt. Point no.	Miejsce poboru próbki Sampling site	Dawka efektywna [mSv/rok] Effective dose [mSv/y]
1	Pieskowa Skała	0,54 ± 0,04	9	Długa Skała – Buk Szafera	0,59 ± 0,04
2	Mokrzys	0,50 ± 0,04	10	Czajowice	0,53 ± 0,04
3	Słoneczna Góra	0,52 ± 0,04	11	Dąbrówka	0,57 ± 0,04
4	Prądnik – Źródło Młynnik	0,58 ± 0,04	12	Zabugaje – Po- ręba	0,55 ± 0,04
5	Grodzisko	0,59 ± 0,04	13	Dolina Sąspow- ska	0,60 ± 0,04
6	Ojców	0,46 ± 0,03	14	Kolencin	0,50 ± 0,04
7	Ojców – Źródło Miłości	0,33 ± 0,03	15	Smardzowice	0,55 ± 0,04
8	Prądnik Czajowski	0,46 ± 0,03	16	Enklawa OPN w Hamernii	0,61 ± 0,04

Tabela 6. Porównanie wartości średnich i zakresów depozycji ^{137}Cs oraz stężeń ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ac dla próbek gleby pochodzących z OPN i innych parków narodowych w Polsce

Table 6. Comparison of mean values and ranges of ^{137}Cs deposition and ^{40}K , ^{226}Ra and ^{228}Ac concentrations for soil samples from ONP and for other National Parks in Poland

Lokalizacja Location	Średnia depozycja (zakres) ^{137}Cs [kBq/m ²] Mean value of ^{137}Cs deposition (range) [kBq/m ²]	Średnie stężenie (zakres) [Bq/kg] Mean value of radionuclide concentration (range) [Bq/kg]		
		^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ac
Ojcowski Park Narodowy	5,32 ± 0,81 (1,14 – 11,92)	491 ± 18 (267 – 562)	36,5 ± 1,2 (27,3 – 43,1)	35,8 ± 1,4 (21,8 – 43,9)
Kampinoski Park Narodowy	1,19 ± 0,08 (0,05 – 2,18)	206 ± 6 (140 – 275)	8,2 ± 0,5 (4,7 – 16,1)	6,5 ± 0,4 (3,6 – 12,0)
Poleski Park Narodowy	1,58 ± 0,05 (0,16 – 5,45)	146 ± 6 (59 – 258)	7,8 ± 0,6 (4,3 – 14,1)	6,3 ± 0,2 (3,4 – 11,5)
Świętokrzyski Park Narodowy	1,02 ± 0,15 (0,06 – 2,65)	245 ± 22 (152 – 503)	12,4 ± 1,9 (4,6 – 33,6)	10,4 ± 1,8 (3,3 – 29,6)
Narwiański Park Narodowy	1,20 ± 0,03 (0,44 – 2,61)	199 ± 8 (158 – 243)	7,7 ± 0,6 (4,2 – 11,4)	6,1 ± 0,3 (3,4 – 8,3)

W celu oszacowania narażenia ludzi przebywających na terenie OPN na promieniowanie jonizujące obliczono roczną dawkę efektywną, korzystając z półempirycznego wzoru (Beck i in., 1972):

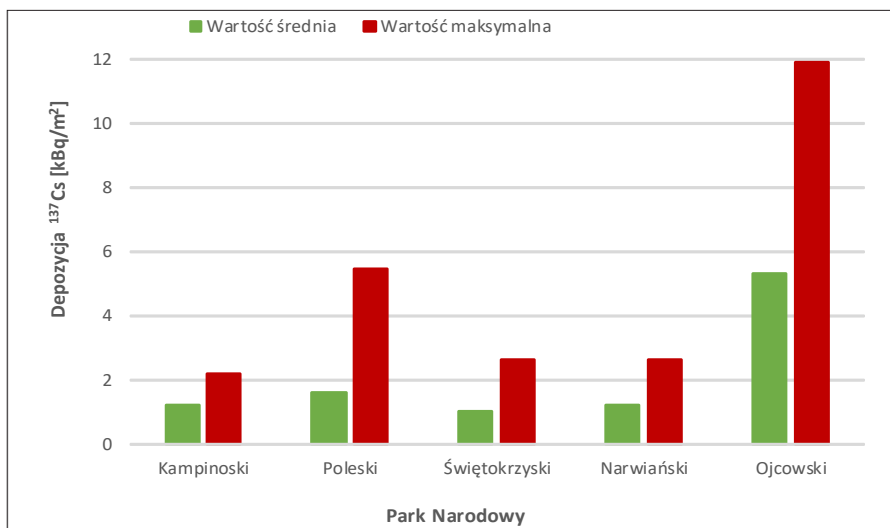
$$\dot{D} = 0,043 S_K + 0,43 S_{Ra} + 0,66 S_{Th} \text{ [nGy/h]}$$

gdzie: S_K , S_{Ra} , S_{Th} – odpowiednio: stężenie ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Th (będącego w równowadze promieniotwórczej z aktywnym ^{228}Ac) w glebie, wyrażone w Bq/kg.

Określona w ten sposób wartość odpowiada mocy dawki promieniowania gamma na wysokości 1 m nad nieograniczoną płaską powierzchnią terenu. Aby otrzymać roczną dawkę efektywną należy pomnożyć moc dawki dla poszczególnych punktów na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego przez liczbę godzin w roku (uwzględniając, że przelicznik z nGy na nSv jest równy jedności). Ponieważ ludzie nie przebywają stale na terenie OPN, wartość ta będzie większa niż w rzeczywistości. Z drugiej strony szacując dawkę efektywną w ten sposób nie uwzględniono innych, zawierających radionuklidy naturalne, komponentów środowiska, które mogłyby wpływać na jej wartość.

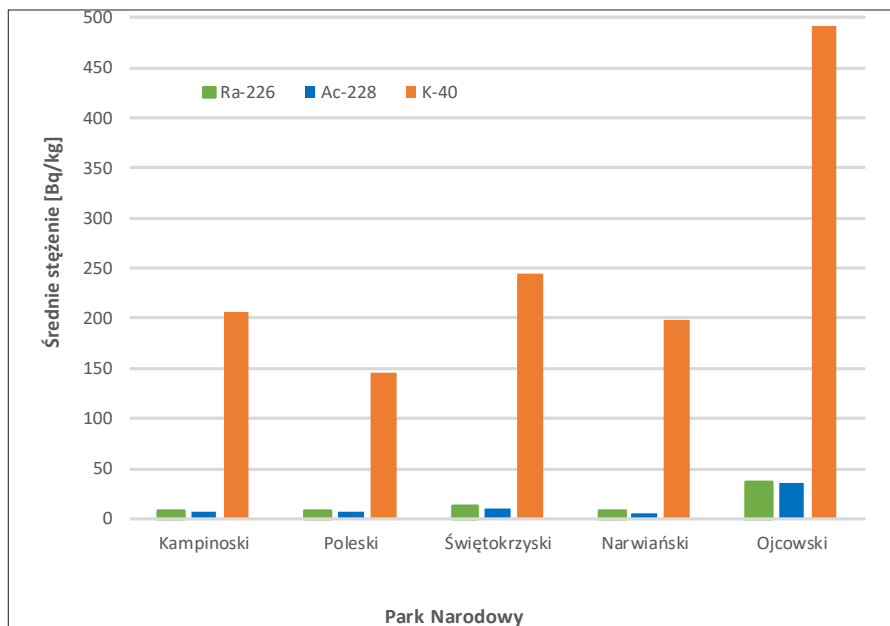
Wartości rocznej dawki efektywnej oszacowane dla poszczególnych punktów poboru gleby z terenu OPN przedstawiono w tab. 5.

Maksymalna dawka efektywna została obliczona dla punktu 16 – Enklawa OPN w Hamerni, a wartość jej wynosi $0,61 \pm 0,07$ mSv/rok. Wartość średnia dla wszystkich punktów poboru gleby w Ojcowskim Parku Narodowym to $0,53 \pm 0,02$ mSv/rok. Biorąc



Ryc. 7. Średnia i maksymalna depozycja ^{137}Cs w próbkach gleby pobranych w różnych Parkach Narodowych w Polsce

Fig. 7. Mean value and maximum of ^{137}Cs deposition in soil samples collected in various National Parks in Poland. Horizontal axis: National Park; vertical axis: Deposition of ^{137}Cs [kBq/m^2]



Ryc. 8. Średnie stężenie ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ac w próbkach gleby pobranych w różnych Parkach Narodowych w Polsce

Fig. 8. Mean value of ^{40}K , ^{226}Ra and ^{228}Ac concentration in soil samples collected in various National Parks in Poland. Horizontal axis: National Park; vertical axis: Mean value of concentration [Bq/kg]

pod uwagę najgorszy scenariusz, czyli maksymalną dawkę efektywną oraz stałe przebywanie na terenie OPN otrzymujemy niewielką część dawki stanowiącej tło naturalne dla Polski (2,4 mSv/rok bez uwzględnienia promieniowania kosmicznego).

Interesujące jest również przedstawienie otrzymanych wyników pomiarów gleby pochodzącej z obszaru OPN na tle innych parków narodowych w Polsce. CLOR prowadził już tego typu badania w Kampinoskim PN (Stawarz i in., 2018), Poleskim PN (Wojtkowski i in., 2021a), Świętokrzyskim PN (Stawarz i in., 2021) i Narwiańskim PN (Wojtkowski i in., 2021b). Wyniki porównania wartości średnich oraz zakresów depozycji cezu ^{137}Cs i stężeń radionuklidów naturalnych zamieszczono w tab. 6.

Na wykresie znajdującym się na ryc. 7. zobrazowano wartości średnie i maksymalne depozycji ^{137}Cs w glebie pochodzącej z różnych parków narodowych w Polsce, mierzonej w CLOR.

Analizując wyniki zamieszczone w tab. 6. oraz na wykresie na ryc. 7. można zauważyć, że wartość średnia oraz wartość maksymalna depozycji cezu w glebie pochodzącej z Ojcowskiego Parku Narodowego jest kilkukrotnie większa niż w badanych przez CLOR próbkach pobranych w innych parkach narodowych. Może to wynikać z faktu, że w tych rejonach nastąpił lokalny opad z chmury radioaktywnej przemieszczającej się nad Polską po awarii czarnobylskiej, bądź też z własności gleby, która nie przepuszcza cezu tak łatwo w głębsze warstwy.

Wartości średnie stężenia powierzchniowego cezu są na zbliżonym poziomie w przypadku pozostałych parków narodowych, zaś najniższą wartość depozycji określono w próbce pochodzącej z Kampinoskiego PN.

Wartości średnie stężeń radionuklidów naturalnych otrzymane dla próbek gleby z tych samych parków narodowych przedstawiono na wykresie znajdującym się na ryc. 8.

Jak wynika z danych zamieszczonych w tab. 6. oraz z wykresu przedstawionego na ryc. 8. wartości średnie stężeń radionuklidów naturalnych w glebie pochodzącej z OPN są kilkukrotnie większe niż w badanych przez CLOR glebach pobranych w pozostałych parkach narodowych. Można też zaobserwować, że w przypadku Świętokrzyskiego Parku Narodowego wartości maksymalne stężeń wszystkich trzech radionuklidów są zbliżone do wartości maksymalnych stężeń zmierzonych w próbkach z Ojcowskiego Parku Narodowego. Ma to związek z różnorodną budową geologiczną rejonu Gór Świętokrzyskich, gdzie można spotkać skały utworzone zarówno w paleozoiku, jak i kenozoiku (trzeciorzęd i czwartorzęd), a nawet w mezozoiku (trias) (www.swietokrzyskipn.org.pl). Czwartorzędowe lessy i gliny, czy też inne gleby o budowie zbliżonej do gleb występujących w rejonie Ojcowa mogą charakteryzować się zbliżoną zawartością potasu, radu i aktywności. Zupełnie inna jest natomiast budowa geologiczna obszarów Kampinoskiego, Poleskiego i Narwiańskiego PN, stąd też dużo niższe wartości stężeń radionuklidów naturalnych w tych rejonach.

WNIOSKI

Wartość średnia depozycji cezu ^{137}Cs w próbkach gleby pochodzących z Ojcowskiego Parku Narodowego wynosi $5,32 \pm 0,81$ kBq/m² i jest wyższa od wartości średniej zarówno dla Polski, jak i dla woj. małopolskiego. Dla porównania - przed awarią w Czarnobylu w 1986 r. wartości stężenia powierzchniowego cezu w glebie Polski zawierały się w zakresie od 0,2 do 0,95 kBq/m² (Grabowski i in., 1999). W niniejszych badaniach najniższa wartość

depozycji cezu w glebie OPN to $1,14 \pm 0,03$ kBq/m² (punkt nr 8 – Prądnik Czajowski), zaś najwyższa to $11,92 \pm 0,25$ kBq/m² (punkt nr 14 – Kolencin). Wartość średnia stężenia potasu ⁴⁰K dla próbek gleby pobranych z obszaru OPN to 491 ± 18 Bq/kg. Minimalną wartość odnotowano dla punktu nr 7 (Ojców – Źródło Miłości), zaś maksymalną dla punktu nr 16 (Enklawa OPN w Hamernii). Wartość średnia stężenia radu ²²⁶Ra w próbkach gleby wynosi $36,5 \pm 1,2$ Bq/kg, przy czym najniższą wartość zmierzono dla punktu nr 7 (Ojców – Źródło Miłości), a najwyższą dla punktu nr 9 (Długa Skała / Buk Szafera). Średnie stężenie aktynu ²²⁸Ac dla próbek gleby z terenu OPN to $35,8 \pm 1,4$ Bq/kg. Wartość minimalną określono dla gleby z punktu nr 7 (Ojców – Źródło Miłości), zaś maksymalną dla punktu nr 13 (Dolina Sąspowska).

Wartości średnie stężeń naturalnych radionuklidów w glebie OPN są wyższe niż wartości średnie dla Polski i dla woj. małopolskiego, za wyjątkiem radu ²²⁶Ra, dla którego wartość średnia stężenia jest najwyższa w przypadku woj. małopolskiego.

Zarówno wartości średnie depozycji ¹³⁷Cs, jak i stężeń ⁴⁰K, ²²⁶Ra oraz ²²⁸Ac są wyższe dla gleby pobranej w OPN niż dla próbek pochodzących z innych parków narodowych. W przypadku cezu wynika to przede wszystkim z faktu, że nad południową Polską padał lokalnie deszcz w momencie przemieszczania się chmury radioaktywnej po awarii EJ w Czarnobylu. Natomiast wyższe stężenia radionuklidów naturalnych są uwarunkowane budową geologiczną tego regionu, co potwierdzają także wyniki otrzymane dla woj. małopolskiego.

Pomiary stężeń radionuklidów naturalnych w próbkach gleby pobranych na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego pozwoliły częściowo ocenić sytuację radiacyjną na tym terenie. Dzięki znajomości wartości stężeń ⁴⁰K, ²²⁶Ra i ²²⁸Ac oszacowano roczną dawkę efektywną dla ludności, czyli narażenie pracowników OPN, turystów, czy okolicznych mieszkańców na promieniowanie jonizujące. Maksymalna dawka wynosi 0,61 mSv/rok (dla punktu 16 – Enklawa OPN w Hamernii), co stanowi 25% tła naturalnego dla Polski (tło bez uwzględnienia promieniowania kosmicznego). Obecność cezu ¹³⁷Cs wnosi znikomy wkład do dawki, dlatego nie był on brany pod uwagę przy jej szacowaniu. Na podstawie wyników pomiarów próbek gleby i oszacowania narażenia można stwierdzić, że obszar OPN jest bezpieczny z punktu widzenia ochrony radiologicznej, pomimo wyższych wartości depozycji ¹³⁷Cs w glebie niż w wielu innych rejonach Polski.

PIŚMIENICTWO

- Beck, H. L. i in. (1972). The Natural Radiation Environment – U.S. *Energy Research and development administration report*.
- Grabowski, D., Kurowski, W., Muszyński, W., Rubel, B., Smagała, G. & Świętochowska, J. (1999). Skażenia promieniotwórcze środowiska i żywności w Polsce w 1998 roku. *Raport CLOR nr 139*. Warszawa: CLOR.
- <http://www.ojcowskiparknarodowy.pl/> (dostęp 29.11.2022).
- <https://www.swietokrzyskipn.org.pl/przyroda/geologia/> (dostęp 15.11.2022).
- Isajenko, K., Piotrowska, B., Stawarz, O., Łukaszek-Chmielewska, A. & Krawczyńska, S. (2017). Analiza dynamiki skażenia gleby naturalnymi i sztucznymi radionuklidami w województwie opolskim po awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 46, 42–54.

- Isajenko, K., Piotrowska, B., Stawarz, O., Wojtkowski, K., Kardaś, M., Kielbasińska, A., Kozdój, M. & Fulara, A. (2022). *Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska w latach 2020–2022. Zadanie 3: Monitoring stężenia cezu-137 w glebie. Raport roczny z III etapu pracy.* Warszawa: CLOR.
- Measurement of Radionuclides In Food and the Environment (1989). *Przewodnik IAEA, Seria Raportów Technicznych nr 295.* Wiedeń: IAEA.
- Stawarz, O., Isajenko, K., Wojtkowski, K., Piotrowska, B. & Ząbek, A. (2018). Ocena sytuacji radiacyjnej na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego na podstawie badania próbek gleby, *Raport roczny CLOR 2017*, 159, 46–47.
- Stawarz, O., Isajenko, K., Piotrowska, B., Wojtkowski, K., Kielbasińska, A. & Kozdój, M. (2021). Ocena sytuacji radiacyjnej na terenie Świętokrzyskiego Parku Narodowego na podstawie badania próbek gleby, *Raport dwuroczny CLOR 2018–2019*, 160/161, 139–140.
- Wojtkowski, K., Isajenko, K., Piotrowska, B., Stawarz, O., Kielbasińska, A., Kwiatkowska, I. & Kolasa, S. (2021a). Ocena sytuacji radiacyjnej na terenie Poleskiego Parku Narodowego (PPN) na podstawie badania próbek gleby, *Raport dwuroczny CLOR 2018–2019*, 160/161, 51–52.
- Wojtkowski, K., Isajenko, K., Piotrowska, B., Stawarz, O., Kozdój, M. & Kielbasińska, A. (2021b). Ocena sytuacji radiacyjnej na terenie Narwiańskiego Parku Narodowego (NPN) na podstawie badania próbek gleby, *Raport roczny CLOR 2020*, 162, 90–92.
- Zalewa, S. (2008). *Gleby Ojcowskiego Parku Narodowego.* W: A., Klasa & J., Partyka (red.), *Monografia Ojcowskiego Parku Narodowego. Przyroda* (s. 137–146), Ojców: Ojcowski Park Narodowy.

SUMMARY

The aim of the study was to assess the radiation situation in Ojców National Park (ONP) on the basis of radiological measurements of soil samples taken from within the park. The concentrations of natural radionuclides (^{40}K , ^{226}Ra and ^{228}Ac) and the concentration of radionuclides of artificial origin – caesium ^{137}Cs , a remnant of the Chernobyl Nuclear Power Plant accident in 1986 – were determined by gamma spectrometry method. The deposition (surface concentration) of ^{137}Cs was calculated based on the mass of the whole sample and caesium concentration in a measured sample. The assessment of the radiation situation in ONP consisted in estimating, based on the results of measurements of natural radionuclide concentrations, the annual effective dose, i.e. the exposure of park employees, local residents and tourists to ionizing radiation.

In addition, the obtained results were compared with the mean values of radionuclide concentrations in soil samples taken by CLOR in previous years in the following National Parks: Kampinos, Polesie, Świętokrzyskie, and Narew, as well as with mean values for Poland and Małopolskie Voivodeship (the results come from radiological monitoring of soil, carried out by CLOR for the Chief Inspectorate of Environmental Protection).

Soil samples were measured on the spectrometric track using the HPGe coaxial detector with an efficiency of 25%. After the measurements were completed, the obtained spectra were analysed. Subsequently, ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ac and ^{137}Cs concentrations in soil samples have been determined and deposition of ^{137}Cs was calculated. Obtained values of natural radionuclides concentrations were used as a basis for the estimations of annual effective dose for people in Ojców National Park.

The mean value of ^{137}Cs deposition for the OPN soil samples is 5.32 ± 0.81 kBq/m². The mean concentrations of ^{40}K , ^{226}Ra and ^{228}Ac are 491 ± 18 Bq/kg, 36.5 ± 1.2 Bq/kg and 35.8 ± 1.4 Bq/kg, respectively.

The mean value of ^{137}Cs deposition in soil from ONP is higher than the mean value for Poland, for Małopolskie Voivodeship, and for other national parks. The mean concentrations of natural radionuclides in the soil of Ojców National Park are higher than the mean values for Poland, Małopolskie Voivodeship, and the above-mentioned national parks. The exception is ^{226}Ra , for which the maximum mean value of concentration was calculated for Małopolskie Voivodeship.

The maximum annual effective dose, estimated on the basis of measurements of natural radionuclide concentration in soil samples taken from the Ojców National Park area, amounts to 0.61 mSv, which represents 25% of the natural background for a statistical inhabitant of Poland. Considering the research results, it can be concluded that people residing in Ojców National Park are safe with regards to radiological protection.