

Andrzej Solecki<sup>1\*</sup>, Kamila Nowak<sup>1</sup>, Wojciech Śliwiński<sup>1</sup> i Dagmara Tchorz-Trzeciakiewicz<sup>1</sup>

Zakład Gospodarki Surowcami Mineralnymi  
Instytut Nauk Geologicznych  
Uniwersytet Wrocławski  
pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław  
tel. 71 375 94 36  
\*email: andrzej.solecki@ing.uni.wroc.pl

## OCENA *IN SITU* RADIOAKTYWNOŚCI MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH W TURYSTYCZNYM CENTRUM SPACEROWYM WROCŁAWIA

### *IN SITU* ASSESSMENT OF BUILDING MATERIAL RADIOACTIVITY OF TOURIST PROMENADE IN WROCLAW

**Abstrakt:** Za pomocą przenośnego gamma-spektrometru RS-320 wykonano pomiary mocy dawki promieniowania gamma  $D_{K, U, Th}$  [nGy/h], generowanej przez naturalne materiały kamienne oraz zawartości uranu, toru i potasu. W pierwszym etapie badań zmierzono zmienność mocy dawki w zależności od grubości warstwy płytek granitowych. Stwierdzono, że w miarę wzrostu miąższości warstwy do wartości 8,4 cm następuje stopniowy wzrost mocy dawki do wartości 84 nGy/h. Powyżej miąższości 8,4 cm dalszy wzrost miąższości warstwy nie powoduje widocznego wzrostu mocy dawki promieniowania gamma, a niewielkie kilkuprocentowe wahania związane są z naturalną zmiennością składu płytek. W drugim etapie badań przeprowadzono pomiary mocy dawki promieniowania gamma  $D_{K, U, Th}$  [nGy/h], generowanej przez naturalne materiały kamienne, zastosowane do budowy promenady na ulicy Świdnickiej we Wrocławiu. Pomiary wykonano w trzech profilach wysokościowych. Pierwsza seria pomiarów, wykonana bezpośrednio na płytach kamiennych, wykazywała znaczne zróżnicowanie mocy dawki promieniowania gamma, wahające się w przedziale od 107,4 nGy/h dla bazaltów do 173,0 nGy/h dla czerwonych granitów. Pomiary wykonane na wysokości 0,5 i 1,0 m wskazują na stopniowe uśrednianie wyników, wynikające z nakładania się efektów przylegających do siebie pasów wykonanych z różnych materiałów kamiennych. Gamma-spektrometryczne pomiary *in situ* umożliwiają bardziej wszechstronną analizę zagrożeń radiacyjnych niż klasyczne pomiary laboratoryjne materiałów budowlanych. Jest to możliwe dzięki pomiarowi końcowego efektu radiacyjnego wynikającego z różnych rozmiarów i geometrii badanych budowli.

**Słowa kluczowe:** radioaktywność, materiały budowlane, moc dawki promieniowania gamma

**Abstract:** Absorbed radiation dose of terrestrial gamma dose rate  $D_{K, U, Th}$  [nGy/h] emitted by building stone has been measured using RS-320 gamma-spectrometer. Also uranium, thorium and potassium content has been measured. In the first stage relation of emitted dose to the thickness of granite tiles layer has been measured and analyzed. Dose increase is evidently related to the layer thickness in the range below 8.4 cm. Later on, further increase of granite layer thickness does not result in significant increasing trend in gamma dose and observed variation is related to natural differences in composition of granite tiles. In the second stage measurements on the promenade of the Swidnicka street in Wroclaw have been carried out in the place where various stone materials (basalt, granodiorite, red and grey granite) have been used. In the case of measurements located directly on the promenade surface gamma dose range varied from 107.4 nGy/h (basalt) to 173.0 nGy/h (red granite). Measurements at the altitude of 0.5 and 1.0 m resulted in more averaged values due to influence of adjacent less radioactive stones. *In situ* gamma-spectrometric measurements seem to be more effective tool of radiological risk assessment than traditional laboratory analyses of building stones due to the possibility of analyzing final result of various geometries and thicknesses of measured constructions.

**Keywords:** radioactivity, building stones, gamma dose

Systematyczne badania zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w surowcach i materiałach budowlanych są prowadzone w Polsce od 1980 roku, czyli od momentu opracowania przez Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR), we współpracy z Instytutem Techniki Budowlanej (ITB), jednolitej metody pomiarów radioaktywności naturalnej.

Szkolenia pracowników powstających laboratoriów prowadzi Zakład Dozymetrii CLOR, a rezultaty badań gromadzone są od roku 1985 w ogólnopolskiej bazie danych [1]. Metodyka badań zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w surowcach oraz materiałach budowlanych została określona przez szereg instrukcji, a także rozporządzeń wymienionych w tabeli 1.

Tabela 1. Rozporządzenia i instrukcje regulujące metodykę i zakres badań zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w surowcach i materiałach budowlanych [1]

Table 1. Legal regulatory acts describing the procedure of building material radioactivity assessment [1]

Rok wydania	Instrukcja lub rozporządzenie
1980	ITB nr 234 pt. „Wytyczne badania promieniotwórczości naturalnej surowców i materiałów budowlanych”.
1995	Instrukcja ITB nr 234/95 pt. „Wytyczne badania promieniotwórczości naturalnej surowców i materiałów budowlanych” rozszerzona o SWW-GUS oraz stopień kontroli wyrobów”.
2002	Rozporządzenie RM z dnia 3.12.2002 r. „w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie oraz kontroli zawartości tych izotopów”.
2003	Instrukcja ITB nr 234/2003, pt. „Badania promieniotwórczości naturalnej surowców i materiałów budowlanych”.
2007	Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 2.01.2007 r. „w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie oraz kontroli zawartości tych izotopów”.

$$f_1 = \frac{S_K}{3\,000 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} \quad f_2 = 185 \quad \text{Poland 2007}$$

$$f_1 = \frac{S_K}{3700 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Ra}}{370 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Th}}{233 \text{ Bq/kg}} \quad f_2 = 185 \quad \text{Poland 2002}$$

$$f_1 = \frac{S_K}{3800 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Ra}}{330 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Th}}{260 \text{ Bq/kg}} \quad f_2 = 200 \quad \text{Taiwan}$$

$$f_1 = \frac{S_K}{4000 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Ra}}{350 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Th}}{260 \text{ Bq/kg}} \quad f_2 = 185 \quad \text{China}$$

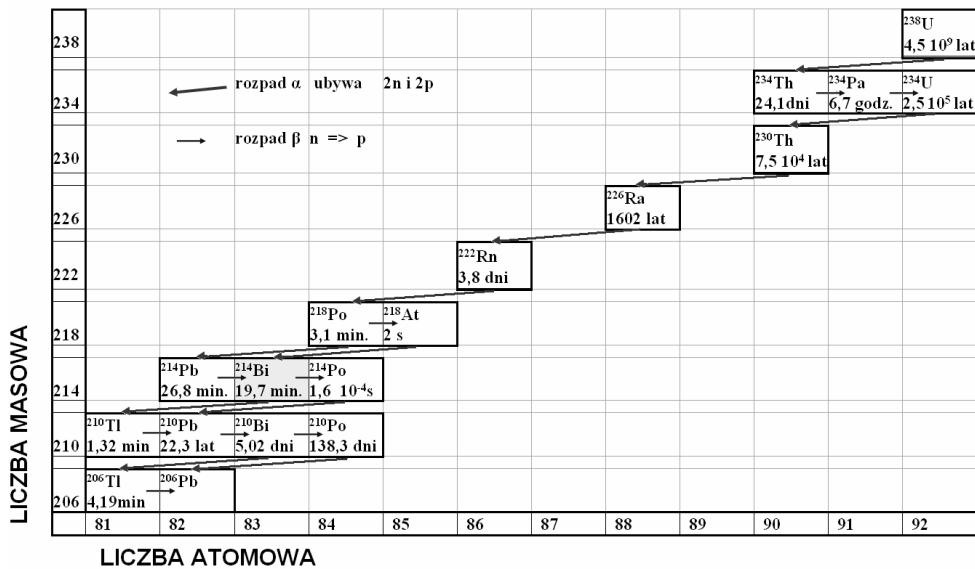
$$f_1 = \frac{S_K}{4810 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Ra}}{370 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Th}}{260 \text{ Bq/kg}} \quad f_2 = 185 \quad \text{USSR, W. Germany}$$

$$f_1 = \frac{S_K}{9990 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Ra}}{999 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Th}}{703 \text{ Bq/kg}} \quad f_2 = 185 \quad \text{Sweden}$$

$$f_1 = \frac{S_K}{9620 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Ra}}{740 \text{ Bq/kg}} (1+0.1 \epsilon_{pd}) + \frac{S_{Th}}{520 \text{ Bq/kg}} \quad \text{Austria}$$

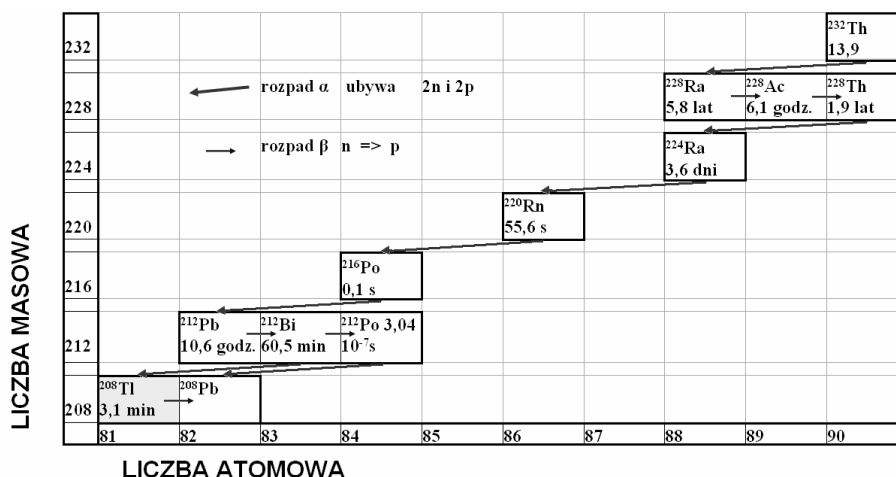
Rys. 1. Stosowane w Polsce wzory obliczeniowe wskaźnika  $f_1$  oraz wartości wskaźnika  $f_2$  (aktywność Ra w Bq/kg) i ich porównanie z zagranicznymi odpowiednikami [2] sprowadzonymi do podobnej postaci; gdzie  $S_K$ ,  $S_{Ra}$  i  $S_{Th}$  są wartościami stężeń odpowiednich radionuklidów wyrażonymi w Bq/kg

Fig. 1. Radioactivity index formulas used in Poland and other countries [2]



Rys. 2. Szereg rozpadu promieniotwórczego uranu  $^{238}\text{U}$ , cieniem podkreślono bizmut  $^{214}\text{Bi}$ , którego promieniowanie gamma stanowi podstawę do obliczeń równoważnej zawartości uranu eU

Fig. 2. Decay series of uranium  $^{238}\text{U}$ , shadowed field of  $^{214}\text{Bi}$ , emitter of gamma photons used for evaluation of equivalent uranium content eU



Rys. 3. Szereg rozpadu promieniotwórczego toru  $^{232}\text{Th}$ , cieniem podkreślono tal  $^{208}\text{Tl}$ , którego promieniowanie gamma stanowi podstawę do obliczeń równoważnej zawartości toru eTh

Fig. 3. Decay series of thorium  $^{232}\text{Th}$ , shadowed field of thallium  $^{208}\text{Tl}$ , emitter of gamma photons used for evaluation of equivalent thorium content eTh

Podstawowymi wskaźnikami opisującymi zawartość naturalnych pierwiastków promieniotwórczych są wskaźniki  $f_1$  i  $f_2$  zdefiniowane wzorami zaprezentowanymi na rysunku 1.

W przypadku wskaźnika  $f_1$  kolejne trzy wyrazy reprezentują udział: promieniowania radioaktywnego izotopu potasu  $^{40}\text{K}$ , radioaktywnych izotopów z szeregu rozpadu uranu  $^{238}\text{U}$ , reprezentowanych we wzorze przez aktywność radu  $^{226}\text{Ra}$  oraz aktywność radioaktywnych izotopów z szeregu rozpadu toru  $^{232}\text{Th}$ .

W przypadku promieniowania radioaktywnego izotopu potasu  $^{40}\text{K}$  za pomocą laboratoryjnych i przenośnych gamma-spektrometrów możliwy jest pomiar i zliczanie kwantów gamma emitowanych przez ten izotop. W przypadku promieniotwórczych izotopów występujących w szeregu rozpadu promieniotwórczego uranu  $^{238}\text{U}$  (rys. 2) najłatwiejsze do pomiaru są kwanty gamma emitowane przez bizmut  $^{214}\text{Bi}$ , który jest najważniejszym emitorem promieniowania gamma w tym szeregu. Podobnie, w przypadku szeregu rozpadu toru  $^{232}\text{Th}$  (rys. 3) najłatwiejszymi do pomiaru są kwanty gamma emitowane przez tal  $^{208}\text{Tl}$ .

W obliczeniach wskaźników  $f_1$  i  $f_2$  uwzględniane są wartości stężeń odpowiednich radionuklidów wyrażone w Bq/kg, w przypadku istnienia stanu równowagi promieniotwórczej w szeregu rozpadu wartości te są równe dla wszystkich kolejnych izotopów w szeregu. Z tego powodu dla układu, w którym panuje stan równowagi promieniotwórczej, stężenie bizmutu  $^{214}\text{Bi}$ , wyrażone w Bq/kg, będzie takie same jak stężenie radu  $^{226}\text{Ra}$  czy też uranu  $^{238}\text{U}$ . Często uzyskany wynik określany jest jako tzw. równoważna zawartość uranu, oznaczana jako eU (uran  $^{238}\text{U}$  stanowi ponad 99% składu uranu naturalnego). Podobnie, jeżeli zmierzmy stężenie talu  $^{208}\text{Tl}$  i uzyskany wynik wyrazimy w Bq/kg, możemy go opisać jako tzw. równoważną zawartość toru, oznaczaną jako eTh.

W przypadku znaczącej większości surowców naturalnych, z racji ich wieku, istnieje zazwyczaj daleko

zaawansowany stan równowagi promieniotwórczej w obrębie szeregów, co wynika z krótkiego, w porównaniu z ich wiekiem, czasu osiągnięcia równowagi promieniotwórczej pomiędzy poszczególnymi izotopami występującymi w szeregach rozpadu uranu  $^{238}\text{U}$  i toru  $^{232}\text{Th}$  (tabele 2 i 3). O ile czas osiągnięcia stanu 99% równowagi pomiędzy uranem  $^{238}\text{U}$  a radem  $^{226}\text{Ra}$  wynosi około 2 mln lat, to analogiczny stan równowagi pomiędzy radem  $^{226}\text{Ra}$  a bizmutem  $^{214}\text{Bi}$  może być osiągnięty w ciągu niespełna 26 dni. Osiągnięcie analogicznego stanu równowagi w całym szeregu rozpadu toru wymaga 51 lat.

Tabela 2. Okresy połowicznego rozpadu i czasy niezbędne do osiągnięcia 99% równowagi radionuklidów szeregu rozpadu promieniotwórczego uranu  $^{238}\text{U}$  [3]

Table 2. Half-life times and 99% equilibrium times for radionuclides of uranium  $^{238}\text{U}$  decay series [3]

Izotop	Okres połowicznego rozpadu	Jednostka	Czas osiągnięcia 99% równowagi	Jednostka
$^{238}\text{U}$	4,468	[ $10^9$ lat]		
$^{234}\text{Th}$	24,1	[dni]	160,1	[dni]
$^{234}\text{Pa}$	1,18	[min]	7,8	[min]
$^{234}\text{U}$	2,48	[ $10^5$ lat]	1,6	[ $10^6$ lat]
$^{230}\text{Th}$	7,52	[ $10^4$ lat]	5,0	[ $10^5$ lat]
$^{226}\text{Ra}$	1602	[lat]	1,0	[ $10^3$ lat]
$^{222}\text{Rn}$	3,825	[dni]	25,4	[dni]
$^{218}\text{Po}$	3,05	[min]	20,3	[min]
$^{214}\text{Pb}$	26,8	[min]	178,1	[min]
$^{218}\text{At}$	2	[s]	13,3	[s]
$^{214}\text{Bi}$	19,7	[min]	130,9	[min]
$^{214}\text{Po}$	1,64	[ $10^{-4}$ s]	10,9	[ $10^{-4}$ s]
$^{210}\text{Tl}$	1,32	[min]	8,8	[min]
$^{210}\text{Pb}$	22,3	[lat]	148,2	[lat]
$^{210}\text{Bi}$	5,02	[dni]	33,4	[dni]
$^{210}\text{Po}$	138,3	[dni]	918,8	[dni]
$^{206}\text{Tl}$	4,19	[min]	27,8	[min]

W środowisku naturalnym najczęstszym przypadkiem nierównowagi jest stan nierównowagi pomiędzy uranem  $^{238}\text{U}$  a radem  $^{226}\text{Ra}$ . Znane są zarówno przykłady wód radowych,

pozbawionych uranu, jak również znane są przypadki młodych mineralizacji uranowych wytraconych we współczesnych torfach, w których nie zdążyły się nagromadzić kolejne izotopy, powstające w wyniku rozpadu uranu i w związku z tym ich gamma radioaktywność jest nieznaczna.

Tabela 3. Okresy połowicznego rozpadu i czasy niezbędne do osiągnięcia 99% równowagi radionuklidów szeregu rozpadu promieniotwórczego toru  $^{232}\text{Th}$  [3]

Table 3. Half-life times and 99% equilibrium times for radionuclides of thorium  $^{232}\text{Th}$  decay series [3]

Izotop	Okres połowicznego rozpadu	Jednostka	Czas osiągnięcia 99% równowagi	Jednostka
$^{232}\text{Th}$	1,39	[ $10^{10}$ lat]		
$^{228}\text{Ra}$	5,75	[lat]	38,2	[lat]
$^{228}\text{Ac}$	6,13	[h]	40,7	[h]
$^{228}\text{Th}$	1,913	[lat]	12,7	[lat]
$^{228}\text{Ra}$	3,64	[dni]	24,2	[dni]
$^{220}\text{Rn}$	55,6	[s]	369,4	[s]
$^{216}\text{Po}$	0,145	[s]	1,0	[s]
$^{212}\text{Pb}$	10,64	[h]	70,7	[h]
$^{212}\text{Bi}$	60,5	[min]	402,0	[min]
$^{212}\text{Po}$	3,04	[ $10^{-7}$ s]	20,2	[ $10^{-7}$ s]
$^{208}\text{Tl}$	3,1	[min]	20,6	[min]

Dopuszczalne wartości wskaźników  $f_1$  i  $f_2$  zależą od zastosowania badanego materiału (tab. 4). Zgodnie z „Radiologicznym Atlasem Polski 2005” [4], średnie wartości wyżej wymienionych wskaźników dla gleb w Polsce wynoszą 0,34 dla wskaźnika  $f_1$  oraz 25 Bq/kg dla wskaźnika  $f_2$ . Średnia moc dawki równoważnej na terenie Polski w dniu 28.11.2010 wynosiła 94,8 nSv/h [5], co odpowiada rocznej dawce 0,8 mSv/a.

Tabela 4. Graniczne wartości wskaźników  $f_1$  i  $f_2$ , dopuszczalne przekroczenie 20% zgodnie z RM z dnia 2.01.2007

Table 4. Limit levels of  $f_1$  and  $f_2$ , radioactivity indices with allowed 20% excess according to RM z dnia 2.01.2007

$f_1$	$f_2$	Zastosowanie
1	200	w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego
2	400	w obiektach budowlanych naziemnych, wznoszonych na terenach zabudowanych lub przeznaczonych do zabudowy w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego oraz do niwelacji takich terenów
3,5	1000	w częściach naziemnych obiektów budowlanych niewymienionych w wierszu 2 oraz do niwelacji terenów niewymienionych w wierszu 2
7	200	w częściach podziemnych obiektów budowlanych, o których mowa w wierszu 3, oraz w budowach podziemnych, w tym w tunelach kolejowych i drogowych, z wyłączeniem odpadów przemysłowych, wykorzystywanych w podziemnych wyrobiskach górniczych

Wskaźniki  $f_1$  i  $f_2$  są wyznaczane przy założeniu, że moc dawki równoważnej promieniowania gamma wytwarzanej przez materiał budowlany nie powinna przekroczyć pewnej granicznej wartości. Wartość graniczną dawki równoważnej w większości krajów, w tym również w Polsce, przyjęto na poziomie 1 mSv/a [2, 6].

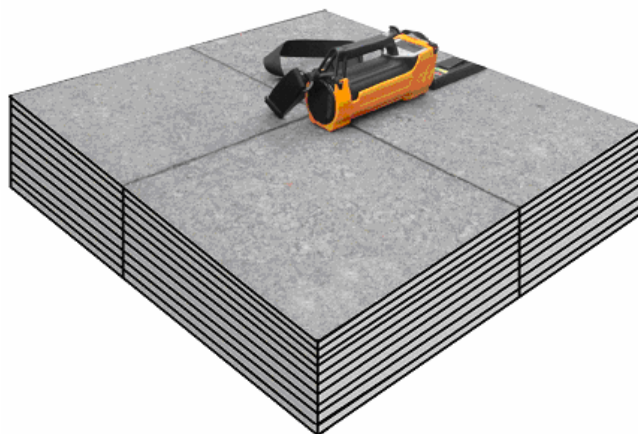
Badanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych prowadzone zgodnie z aktualnymi instrukcjami i rozporządzeniami jest procedurą pracochłonną i kosztowną. Zgodnie z §6 RM z dnia 2.01.2007 r. [7], próbki powinny być pobierane z częstotliwością uzależnioną od procesu technologicznego w sposób zapewniający ich reprezentatywność. Należy je wysuszyć do suchej masy i rozdrobnić do wymiarów poniżej 2 mm. Jeżeli oznaczanie zawartości radu  $^{226}\text{Ra}$  odbywa się przez pomiar promieniowania produktów jego rozpadu, to przed rozpoczęciem pomiaru naczynie pomiarowe z próbką należy pozostawić szczelnie zamknięte przez okres 14 dni. Okres ten może być skrócony do 5 dni, jeżeli surowiec jest pochodzenia naturalnego i nie był poddawany procesowi przeróbki, albo był składowany na placu przez okres 30 dni. Koszt pojedynczej analizy sięga kilkuset złotych, nie licząc kosztu pobrania i transportu próbki. Reprezentatywność kilkukilogramowej próbki pobranej z kamieniołomu, eksploatującego kilkadziesiąt do kilkuset tysięcy ton surowca rocznie, jest trudna do zapewnienia, dlatego też wiarygodne rozpoznanie w przypadku złoża o zmiennych parametrach wymaga dziesiątek, jeżeli nie setek czy tysięcy próbek.

## Metodyka badań

Badania prowadzono za pomocą przenośnych gamma-spektrometrów RS-320. Wyniki badań gamma-spektrometrycznych rejestrowane były jako moc dawki pochłoniętej  $D_{K, U, Th}$  [nGy/h] generowanej przez radionuklidy szeregów uranu i toru oraz potas  $^{40}\text{K}$ . Należy zaznaczyć, że w przypadku promieniowania gamma moc dawki pochłoniętej wyrażona w nGy/h jest równa mocy dawki równoważnej wyrażonej w nSv/h. Dawka równoważna opisuje biologiczną skuteczność promieniowania. Rejestrowano również procentową zawartość potasu K [%] oraz równoważne zawartości uranu eU [ppm] i toru eTh [ppm]. Badanie ma charakter nieniszczący, w związku z tym możliwe było wykonywanie pomiarów w już istniejących budowach, wykorzystujących różne materiały budowlane.

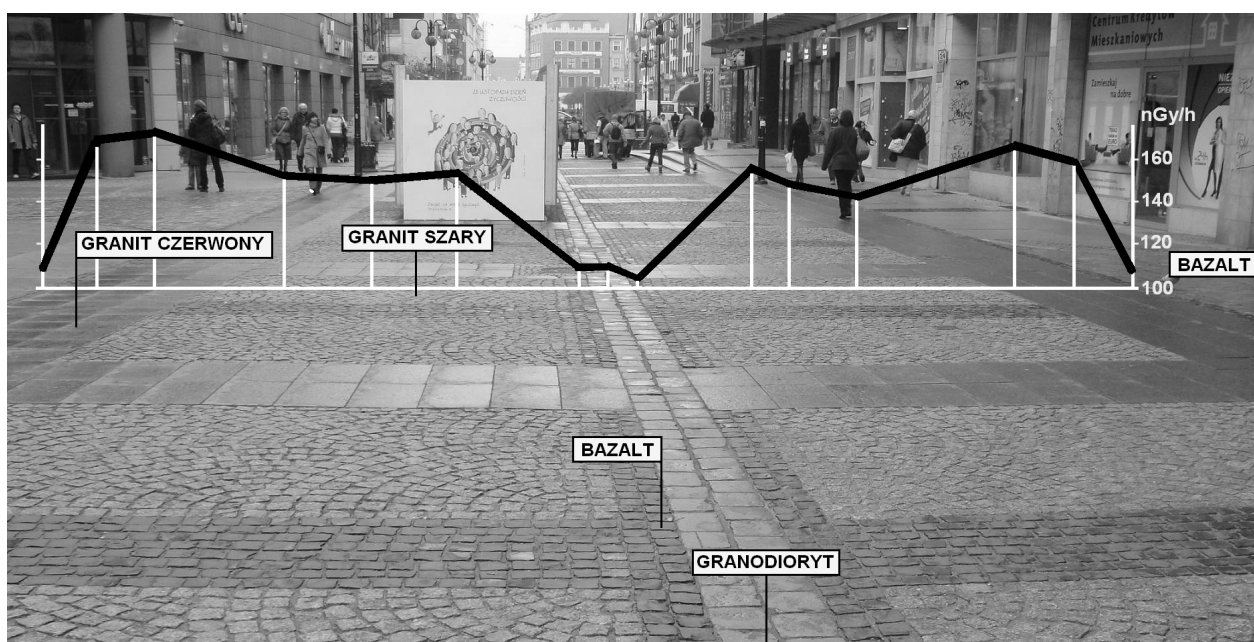
W celu przeanalizowania wpływu grubości warstwy materiału kamiennego na wartość mocy dawki promieniowania gamma wykonano pomiary dla warstwy płytek granitowych o zmiennej grubości. Badanie to przeprowadzono na pomoście drewnianym umieszczonym na środku koryta rzeki Odry w celu zapewnienia jak najniższego poziomu tła. Pomiary wykonano na powierzchni warstwy płytek granitowych granitu chińskiego „yellow tiger” o grubości 12 mm i rozmiarach 300 na 300 mm. Płytki układano po cztery tak, aby instrumenty pomiarowe znajdowały się na środku warstwy o rozmiarach 0,6 na 0,6 m. Pomiary rozpoczęto od warstwy 10 płytek o łącznej grubości 120 mm (rys. 4). Dla każdej grubości warstwy wykonywano dwa 3-minutowe pomiary gamma-spektrometryczne. Grubość warstwy płytek stopniowo zmniejszano, zdejmując kolejne warstwy i na końcu wykonano pomiar tła na pomoście.

Pomiary w obrębie budowli wykorzystującej różne rodzaje materiałów kamiennych wykonano we Wrocławiu na ul. Świdnickiej, w miejscu, gdzie promenada spacerowa wyłożona jest różnego rodzaju materiałem kamiennym (rys. 5). Promenada ta, o symetrycznie ułożonych płytach i kostkach kamiennych w centralnej osiowej części badanego profilu, wyłożona była dwoma rzędami kostek granodiorytu, obramowanych z obu stron podwójnymi rzędami kostki bazaltowej, po których następowało pole wyłożone kostką z szarego granitu. Za polami wyłożonymi kostką z szarego granitu po obu stronach promenady znajdowały się trzy rzędy płyt z czerwonego granitu, obrzeżone jednym rzędem kostki bazaltowej, oddzielającej promenadę od starej części chodnika. Profil przebiegał kolejno (od lewej do prawej strony na rys. 5) przez podłoże zbudowane z bazaltu, czerwonego granitu, szarego granitu, bazaltu, granodiorytu, bazaltu, szarego granitu, czerwonego granitu i bazaltu. Pomiary wykonywano w trzech seriach. Pierwszą serię pomiarów wykonano na powierzchni materiału kamiennego. Drugą serię pomiarów wykonano na wysokości 0,5 m nad powierzchnią promenady. Trzecią serię pomiarów wykonano na wysokości 1 m. Dla każdej serii pomiarów wykonywano 3-minutowe pomiary gamma-spektrometryczne w 15 punktach.



Rys. 4. Układ pomiarowy dla warstwy 10 płytek granitu

Fig. 4. Measuring system for the layer of 10 granite tiles



Rys. 5. Profil pomiarowy mocy dawki promieniowania gamma generowanej przez kamienne podłoże na promenadzie ulicy Świdnickiej (Wrocław)

Fig. 5. Radiometric profile of terrestrial gamma dose on the promenade of the Świdnicka street (Wrocław)

## Wyniki

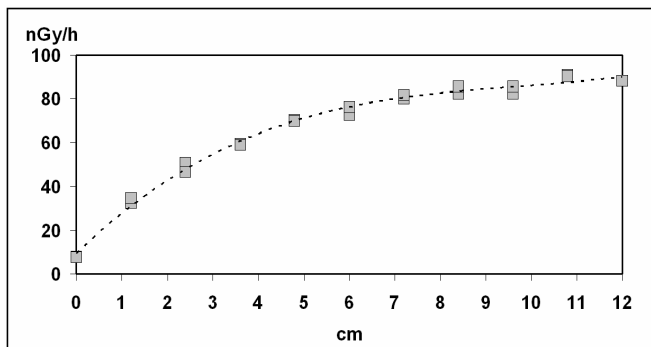
Warstwę płytek granitowych „yellow tiger” mierzono na środku koryta Odry we Wrocławiu na pomoście drewnianym. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5. Tło promieniowania gamma emitowanego przez radionuklidy szeregów uranu i toru oraz potas  $^{40}\text{K}$  wahało się w tym miejscu od 7,5 do 7,8 nGy/h. Położenie pierwszej warstwy płytek granitowych o miąższości 1,2 cm spowodowało ponad 3-krotny (337,9%) wzrost mocy dawki do poziomu

33,5 nGy/h. W miarę zwiększania miąższości warstw płytek moc dawki rosła stopniowo w sposób pokazany na rysunku 6. Po osiągnięciu miąższości 8,4 cm moc dawki doszła do 84,0 nGy/h, a dalsze przyrosty oscylowały wokół zera, osiągając kilkuprocentowe, na przemian dodatnie i ujemne, wartości (tab. 5). Wahania te wynikały z naturalnej niejednorodności materiału płytek.

Tabela 5. Rezultaty pomiarów radiometrycznych nad warstwą płytek granitowych o zmiennej miąższości

Table 5. Results of radiometric measurements over the granite tiles layer of various thickness

Opis	Łączna miąższość [cm]	Nr pomiaru	$D_{K,U,Th}$ [nGy/h]	Średnia $D_{K,U,Th}$ [nGy/h]	Względny przyrost $D_{K,U,T}$ [%]	K [%]	eU [ppm]	eTh [ppm]	$f_i$	mSv/a
tło bez płytek	0,0	T1	7,8	7,7		0,1	0,7	1,0	0,06	0,1
	0,0	T2	7,5			0,1	0,7	0,8	0,06	0,1
1 płytka	1,2	I/1	32,4	33,5	337,9	1,1	1,3	3,9	0,24	0,3
	1,2	I/2	34,6			1,2	1,3	4,4	0,26	0,3
2 płytki	2,4	II/1	50,9	48,8	45,5	1,6	2,0	6,8	0,38	0,4
	2,4	II/2	46,6			1,6	1,6	6,0	0,35	0,4
3 płytki	3,6	III/1	59,5	59,2	21,3	2,1	2,0	7,9	0,46	0,5
	3,6	III/2	58,8			2,1	1,9	8,1	0,46	0,5
4 płytki	4,8	IV/1	70,3	70,1	18,4	2,3	2,3	10,2	0,54	0,6
	4,8	IV/2	69,8			2,4	2,2	9,8	0,53	0,6
5 płytek	6,0	V/1	72,6	74,4	6,1	2,6	2,3	9,5	0,55	0,6
	6,0	V/2	76,1			2,5	2,4	11,1	0,58	0,7
6 płytek	7,2	VI/1	80,2	81,0	8,9	2,7	1,8	12,8	0,61	0,7
	7,2	VI/2	81,8			2,7	2,9	11,9	0,64	0,7
7 płytek	8,4	VII/1	82,3	84,0	3,6	3,0	2,0	11,8	0,63	0,7
	8,4	VII/2	85,6			2,9	2,2	13,0	0,65	0,7
8 płytek	9,6	VIII/1	82,1	83,9	-0,2	2,9	2,1	12,2	0,63	0,7
	9,6	VIII/2	85,5			3,0	2,4	12,3	0,65	0,7
9 płytek	10,8	IX/1	90,9	90,7	8,2	3,1	3,0	12,5	0,69	0,8
	10,8	IX/2	90,4			3	2,3	14,4	0,69	0,8
10 płytek	12,0	X/1	88,2	88,2	-2,7	3,1	2,2	13,2	0,67	0,8
	12,0	X/2	88,2			2,9	3,1	12,4	0,67	0,8

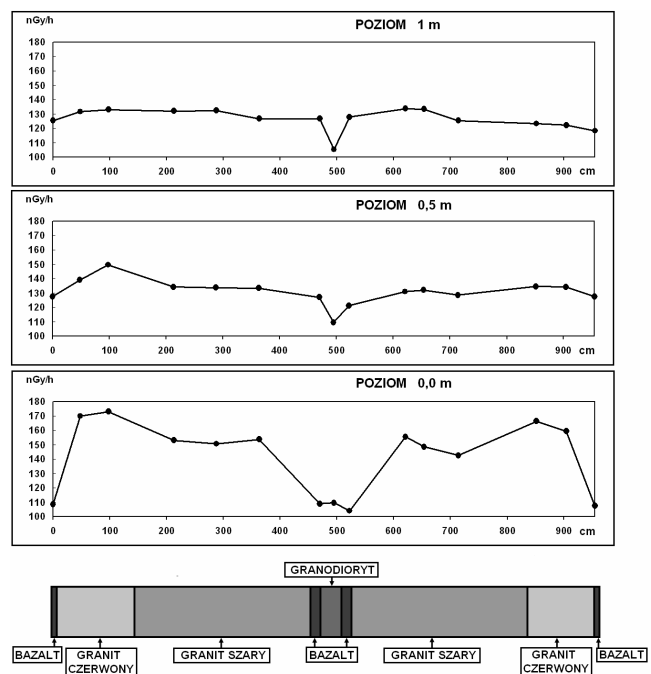


Rys. 6. Moc dawki promieniowania gamma emitowanej przez warstwę płytek granitowych o zmiennej miąższości

Fig. 6. Terrestrial gamma dose over the granite tiles layer of various thickness

Wyniki pomiarów mocy dawki promieniowania gamma wykonane na powierzchni promenady ulicy Świdnickiej, wahają się od 103,7 nGy/h w przypadku podłoża bazaltowego do 173,0 nGy/h w przypadku podłoża zbudowanego z czerwonego granitu (rys. rys. 5, 7; tabele 6-8). Ogólnie większa moc dawki promieniowania gamma wynika z faktu, że profil pomiarowy zlokalizowany był w obrębie promenady otoczonej wysokimi budynkami, których ściany również stanowiły źródło promieniowania pochodzącego od izotopów promieniotwórczych szeregów uranu i toru oraz potasu  $^{40}\text{K}$ . Mimo to zależność mocy dawki promieniowania od charakteru podłoża była wyraźna nawet w przypadku wąskich pojedynczych rzędów kostki bazaltowej na początku i końcu profilu. Dwa podwójne rzędy kostki bazaltowej rozdzielone podwójnym rzędem kostki granodiorytowej w centrum profilu dawały jeszcze bardziej widoczne obniżenie mocy dawki promieniowania gamma. W profilach wykonanych na wysokości 0,5 i 1,0 m, mimo

ogólnego uśrednienia wyników, obniżenie to jest szczególnie mocno zarysowane na skutek połączenia wpływu obu rzędów kostki bazaltowej, dominującego wyraźnie nad wpływem granodiorytu, który w przypadku profilu wykonywanego na powierzchni promenady nieznacznie podnosił moc dawki promieniowania gamma.



Rys. 7. Wyniki pomiaru mocy dawki promieniowania gamma generowanej przez kamienne podłoża na promenadzie ulicy Świdnickiej (Wrocław)

Fig. 7. Results of in situ terrestrial gamma dose assessment on the promenade of the Swidnicka street (Wrocław)

Tabela 6. Rezultaty pomiarów mocy dawki promieniowania gamma wykonanych na powierzchni promienady

Table 6. Results of the gamma dose rate measurement carried out on the surface of promenade

Lp.	D <sub>K, U, Th</sub> [nGy/h]	K [%]	eU [ppm]	eTh [ppm]	f <sub>i</sub>	mSv /a
1	108,3	2,9	4,1	18,1	0,83	0,9
2	169,7	4,7	4,1	31,7	1,29	1,5
3	173,0	4,7	4,6	32,3	1,33	1,5
4	153,0	4,4	6,2	23,0	1,17	1,3
5	150,6	4,4	6,4	21,7	1,15	1,3
6	153,6	4,3	7,0	21,9	1,17	1,3
7	108,8	2,9	5,5	15,0	0,83	1,0
8	109,3	3,3	4,5	15,2	0,83	1,0
9	103,7	2,9	4,7	14,7	0,79	0,9
10	155,6	4,4	7,3	21,6	1,19	1,4
11	148,5	4,2	6,9	20,6	1,13	1,3
12	142,4	4,3	5,6	20,5	1,08	1,2
13	166,4	4,4	5,1	30,1	1,27	1,5
14	159,2	4,3	3,8	30,4	1,21	1,4
15	107,4	3,0	4,3	16,8	0,82	0,9

Tabela 7. Rezultaty pomiarów mocy dawki promieniowania gamma wykonanych 0,5 m ponad powierzchnią promienady

Table 7. Results of the gamma dose rate measurement carried out 0.5 m above the surface of promenade

Lp.	D <sub>K, U, Th</sub> [nGy/h]	K [%]	eU [ppm]	eTh [ppm]	f <sub>i</sub>	mSv /a
1	127,5	3,6	4,1	21,7	0,98	1,1
2	139,1	3,7	5,5	22,9	1,07	1,2
3	149,4	3,9	5,3	26,0	1,15	1,3
4	134,0	3,8	5,6	20,2	1,03	1,2
5	133,6	3,7	5,3	20,9	1,02	1,2
6	133,2	3,8	5,0	21,0	1,02	1,2
7	126,9	3,5	5,2	19,5	0,97	1,1
8	109,6	3,1	4,3	16,8	0,83	1,0
9	121,0	3,2	5,5	18,1	0,92	1,1
10	131,0	3,7	5,5	19,3	1,00	1,1
11	132,1	3,8	5,9	18,8	1,01	1,2
12	128,3	3,9	4,8	19,2	0,99	1,1
13	134,3	3,9	4,3	22,3	1,03	1,2
14	134,0	3,7	4,7	22,1	1,02	1,2
15	127,5	3,5	3,9	22,5	0,98	1,1

Tabela 8. Rezultaty pomiarów mocy dawki promieniowania gamma wykonanych 1,0 m ponad powierzchnią promienady

Table 8. Results of the gamma dose rate measurement carried out 1.0 m above the surface of promenade

Lp.	D <sub>K, U, Th</sub> [nGy/h]	K [%]	eU [ppm]	eTh [ppm]	f <sub>i</sub>	mSv /a
1	125,2	3,5	5,4	18,5	0,95	1,1
2	131,5	3,3	5,9	20,8	1,00	1,2
3	133,0	3,7	5,6	20,1	1,02	1,2
4	131,9	3,6	5,1	21,3	1,01	1,2
5	132,3	3,6	5,6	20,4	1,01	1,2
6	126,5	3,7	5,2	18,6	0,97	1,1
7	126,6	3,3	5,0	20,8	0,97	1,1
8	105,1	2,5	6,2	14,5	0,80	0,9
9	127,8	3,5	5,7	19,0	0,98	1,1
10	133,8	3,7	5,3	20,9	1,02	1,2
11	133,5	3,8	5,8	19,7	1,03	1,2
12	125,2	3,4	5,5	18,9	0,96	1,1
13	123,0	3,3	4,2	21,0	0,94	1,1
14	122,1	3,2	4,3	21,2	0,93	1,1
15	118,4	3,2	5,1	18,2	0,91	1,0

## Podsumowanie

Gamma-spektrometryczne pomiary *in situ* przeprowadzone w różnych warunkach pomiarowych wykazały, że mogą dostarczyć danych o efekcie radiacyjnym wyrażonych zarówno w wartościach wskaźnika  $f_1$ , jak i dawki pochłoniętej/równoważnej. Dodatkowo pomiar *in situ* uwzględnia całokształt warunków środowiskowych, w tym także niezwykle ważną grubość (miąższość) warstwy użytego materiału [2].

Biorąc pod uwagę skutki zdrowotne, należy analizować uzyskane wyniki w stosunku do średnich naturalnych. Zmierzone wartości wskazują, że w przypadku pomiarów na powierzchni czerwonego granitu ( $f_1 = 1,33$ ; dawka równoważna 1,5 mSv/a) może dojść do nieznacznego przekroczenia mocy dawki promieniowania gamma w stosunku do średniej krajowej ( $f_1 = 0,34$ ; dawka równoważna 0,8 mSv/a). Dodatkowo należy podkreślić, że przyjęte limity mocy dawki promieniowania gamma zakładają pomiar na wysokości 1,0 m, a w tym przypadku uzyskane wyniki są wyraźnie niższe z powodu niewielkich rozmiarów powierzchni wyłożonej czerwonym granitem. Z tego powodu przy pomiarach na większej wysokości znaczący staje się wpływ promieniowania innych, mniej aktywnych źródeł (bazalt, granodioryt, granit szary). Z punktu widzenia ochrony radiologicznej ważny jest również czas przebywania w polu promieniowania gamma o określonej mocy. Dlatego też, reasumując, należy stwierdzić, że wprawdzie całoroczne przebywanie na podłożu zbudowanym z czerwonego granitu (a tym bardziej wewnątrz budynku wyłożonego tym materiałem) mogłoby doprowadzić do przekroczenia dopuszczalnej wartości dawki pochłoniętej, ale stosowanie go jako lokalnego kamienia dekoracyjnego o ograniczonej grubości płyt nie stwarza sytuacji przekroczenia poziomu radiacji będącego podstawą istniejących norm.

## Podziękowania

Prace wykonywano w ramach projektu badawczego „Strategie i scenariusze technologiczne zagospodarowania i wykorzystania surowców skalnych” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

## Literatura

- [1] Badanie radioaktywności naturalnej surowców i materiałów budowlanych w Polsce w latach 1980-2008. CENTRALNE LABORATORIUM OCHRONY RADIOLOGICZNEJ, Zakład Dozymetrii 2008. <http://izba.budowlany.pl/files/seminaria/CLOR.pdf>
- [2] Ching-Jiang Chen i Lin, Yu-Ming.: Environ. Int., 1996, **22**, (Suppl. 1), S221-S226.
- [3] Solecki A.T.: Anomalie radiometryczne środkowej części obszaru przedśudeckiego i ich związek ze środowiskiem geologicznym. Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław 2000.
- [4] Radiologiczny atlas Polski 2005. Główny Inspektor Ochrony Środowiska. CLOR, Warszawa 2006.
- [5] <http://www.paa.gov.pl/dokumenty/komunikat.pdf>, przeglądano 28.11.2010

- [6] UNSCEAR 2010: Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to General Assembly with Scientific Annexes, Vol. I Annex B.
- [7] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 2.01.2007 r. „w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232 w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów”.