

**GLÓWNY INSTYTUT GÓRNICWA  
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY**

Rozprawa doktorska

mgr inż. Agata Grygier

**Jednoczesna ocena narażenia radonowego  
i toronowego na podziemnych stanowiskach pracy  
z wykorzystaniem metody termoluminescencji**

Promotor:

dr hab. Krystian Skubacz prof. GIG-PIB

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Michał Bonczyk, prof. GIG-PIB

Katowice, 2025

# Podziękowania

Pragnę serdecznie podziękować mojemu Promotorowi, Krystianowi Skubaczowi, za nieocenione wsparcie, cenne wskazówki oraz inspirację w trakcie pisania niniejszej rozprawy. Pańska wiedza, zaangażowanie i cierpliwość były dla mnie niezwykle cenne i stanowiły nieocenioną pomoc na każdym etapie mojej pracy.

Podziękowania kieruję także do mojego Promotora Pomocniczego, Michała Bonczyka, za merytoryczne wsparcie, cenne uwagi i wskazówki, które przyczyniły się do kształtu tej pracy.

Dziękuję również moim Koleżankom i Kolegom ze Śląskiego Centrum Radiometrii za motywację, ciepłe słowa oraz wyrozumiałość w momentach największego skupienia nad doktoratem. Wasza obecność i pomoc miały ogromne znaczenie w tym procesie.

Szczególne wyrazy wdzięczności kieruję do Zarządu i Pracowników Zabytkowej Kopalni Srebra w Tarnowskich Górach, Kolegów z Kopalni Doświadczalnej Barbara w Mikołowie i Koleżanek z Istituto Superiore di Sanità w Rzymie, którzy umożliwili mi przeprowadzenie pomiarów oraz okazali wsparcie w sprawach technicznych. Ich pomoc i zaangażowanie miały kluczowe znaczenie dla realizacji badań, za co serdecznie dziękuję.

Dziękuję wszystkim, którzy w jakikolwiek sposób przyczynili się do powstania tej pracy.

# Streszczenie

Praca koncentruje się na wyzwaniach naukowych i technicznych, związanych z monitorowaniem stężeń energii potencjalnej alfa produktów rozpadu promieniotwórczego radonu i toronu w powietrzu, dla których opracowano metodę jednoczesnego pomiaru tej wielkości. Pierwszy rozdział pracy to wprowadzenie do zagadnienia narażenia na promieniowanie jonizujące, w szczególności narażenia na pochodne radonu i toronu, a zarazem uzasadnienie wyboru tematu pracy. W rozdziale drugim zawarto podstawowe informacje na temat radonu i jego krótkożytych produktów rozpadu. W tej części zgromadzono informacje ogólne o badanych nuklidach promieniotwórczych, a także opis zachowania się radonu w atmosferze i proces powstawania aerozoli promieniotwórczych. Przedstawiono także kilka podstawowych wzorów, które będą miały zastosowanie w późniejszych rozważaniach. Ostatnia część rozdziału przedstawia opis wpływu radonu i toronu na zdrowie ludzi. Rozdział trzeci to przegląd obowiązujących w Polsce przepisów prawnych, odnoszących się do obecności radonu/toronu i produktów ich rozpadu w miejscach pracy. Omówiono w nim wszystkie najważniejsze regulacje dotyczące zagrożeń związanych z tymi nuklidami, a także zalecenia Komisji Europejskiej i International Commission on Radiological Protection (ICRP). Kolejna część pracy to prezentacja metod wykorzystywanych do pomiaru stężenia produktów rozpadu radonu i toronu. Rozdział piąty to opis opracowanej metody pomiarowej, umożliwiającej jednoczesny pomiar stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Pierwsza część rozdziału zawiera opis konstrukcji zastosowanego miernika, natomiast dalsza część to przedstawienie sposobu oceny stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu oraz analizy statystycznej. Kolejne rozdziały przedstawiają wyniki przeprowadzonych badań. Rozdział szósty opisuje przebieg procedury kalibracji mierników oraz otrzymane rezultaty. Szczególną uwagę skierowano na zachowanie się produktów rozpadu radonu i toronu w komorze klimatycznej i zastosowaną metodę referencyjną do oznaczania wzorcowego stężenia energii potencjalnej alfa. Ponadto przedstawiono wyniki pomiaru frakcji wolnej w komorze oraz wpływ układów separujących aerozole tzw. mikrocyklonów na pomiar. Rozdział siódmy zawiera wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu na podziemnych stanowiskach pracy i ocenę narażenia pracowników na produkty rozpadu radonu/toronu. Ostatnią część rozdziału poświęcono na przedstawienie wyników badań międzylaboratoryjnych przeprowadzonych w warunkach in situ w Zabytkowej Kopalni Srebra w Tarnowskich Górach. Ostatni rozdział pracy to podsumowanie prezentując zalety i wady opracowanej metody, a także wskazanie dalszych kierunków pracy nad jej udoskonaleniem. W dodatku do pracy przedstawiono

funkcje opisujące systematyczny rozpad promieniotwórczy produktów rozpadu radonu i toronu na filtrze. Funkcje te wykorzystywano do obliczania wartości referencyjnych stężenia energii potencjalnej alfa.

## **Abstract**

The work focuses on the scientific and technical challenges of monitoring the potential alpha energy concentrations of radon and thoron radioactive decay products in the air, for which a method for simultaneous measurement of this quantity has been developed. The first chapter of the work is an introduction to the issue of exposure to ionizing radiation, particularly exposure to radon and thoron progeny, and at the same time, a justification for the choice of the topic of the work. The second chapter contains basic information about radon and its short-lived decay products. This section gathers general information about the radionuclides under study, a description of radon's behaviour in the atmosphere, and the formation process of radioactive aerosols. The chapter also presents some basic formulas for later consideration. The last part of the chapter describes the effects of radon and thoron on human health. The third chapter is an overview of the current legislation in Poland, which addresses the issue of radon/thoron and their decay products. It discusses all the major regulations on the risks of these nuclides and the recommendations of the European Commission and ICRP (International Commission on Radiological Protection). The next part of the work describes the methods used to measure the concentration of radon and thoron decay products. Chapter five describes the method developed to simultaneously measure the potential alpha energy concentration of radon and thoron decay products. The first part of the chapter describes the design of the meter used. In contrast, the next part presents the method of assessing the potential alpha energy concentration of radon and thoron decay products and a statistical evaluation. Subsequent chapters present the results of the tests carried out. The sixth chapter describes the procedure of meter calibration, and the results obtained. In particular, the behaviour of radon and thoron decay products in the climate chamber and the reference method used to determine the standard potential alpha energy concentration are described. In addition, the results of the measurement of the unattached fraction in the chamber are presented, as well as the effect of aerosol separation systems, called micro cycles, on the measurement. The seventh chapter contains the measurements of the potential alpha energy concentration of radon and thoron decay products at subterranean workplaces and the assessment of workers' exposure to radon/thoron decay products. The last part of the chapter is devoted to presenting the results of inter-laboratory tests conducted under in situ conditions

at the Historic Silver Mine in Tarnowskie Góry. The last chapter of the paper is a summary containing the advantages and disadvantages of the developed method, as well as indicating further directions for work on its improvement. The appendix to the work presents functions describing the systematic radioactive decay of radon and thoron decay products on the filter. These functions were used to calculate reference values of potential alpha energy concentration.

# Spis treści

Wykaz stosowanych symboli .....	8
Słownik podstawowych terminów wykorzystywanych w pracy .....	13
Spis rysunków .....	14
Spis tabel .....	16
1. Wprowadzenie .....	18
2. Radon i toron .....	22
2.1. Radon i toron. Informacje podstawowe. ....	22
2.2. Radon i toron w środowisku .....	26
2.3. Aerozole promieniotwórcze.....	29
2.4. Wielkości stosowane w ocenie zagrożenia radonowego .....	31
2.5. Zagrożenie radonowe a zdrowie .....	34
2.6. Występowanie zagrożeń radonowych i toronowych .....	35
3. Zagrożenie radonowe w prawodawstwie europejskim i krajowym .....	38
4. Metody pomiaru stężeń promieniotwórczych radonu i toronu oraz produktów ich rozpadu .....	44
4.1. Pomiary stężenia promieniotwórczego radonu i toronu .....	44
4.2. Pomiar stężeń produktów rozpadu radonu i toronu oraz energii potencjalnej alfa .....	45
4.3. Urządzenia do pomiaru stężeń produktów rozpadu radonu i toronu .....	50
5. Opracowanie metody jednoczesnego pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu .....	52
5.1. Konstrukcja miernika.....	52
5.2. Wyznaczanie stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu .....	57
5.2.1. Podstawowe zasady pomiaru .....	57
5.2.2. Ocena sygnału netto.....	58
5.2.3. Ocena stężenia energii potencjalnej alfa.....	63
5.2.4. Ocena statystyczna.....	65

6.	Kalibracja mierników .....	68
6.1.	Procedura kalibracyjna .....	68
6.2.	Produkty rozpadu radonu i toronu w komorze radonowej .....	71
6.3.	Ocena referencyjnego stężenia energii potencjalnej alfa.....	73
6.4.	Fracja wolna produktów rozpadu radonu w komorze radonowej.....	76
6.5.	Zakłócenia wprowadzane przez cyklon .....	77
6.6.	Wyniki kalibracji .....	79
6.7.	Obliczenia .....	84
7.	Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa i ocena dawki skutecznej .....	86
7.1.	Zabytkowa Kopalnia Srebra w Tarnowskich Górach.....	87
7.2.	Kopalnia Doświadczalna Barbara GIG-PIB .....	92
7.3.	Starożytne obiekty w Rzymie .....	98
7.4.	Pomiary porównawcze w Zabytkowej Kopalni Srebra .....	103
8.	Podsumowanie.....	107
	Literatura.....	112
	Dodatek 1 .....	121
1.	Funkcje $\Gamma_{ij}(t_p, t_1, t_2)$ .....	121
2.	Funkcje $F_{ij}(t, t_p)$ .....	123
3.	Funkcje $G_{ij}(t, t_p)$ .....	124
4.	Funkcje $\text{Int}F_{ij}(t)$ .....	125
5.	Funkcje $\text{Int}G_{ij}(t, t_p)$ .....	126

## Wykaz stosowanych symboli

$A_{Mi}$  – wyniki odczytu detektora TL znajdującego się bezpośrednio nad filtrem. Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym  $M=1$  wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_1$ , a  $M=2$  na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_2$ . Indeks  $i$  wskazuje na określoną głowicę pomiarową w mierniku.

$B_{Mi}$  – wyniki odczytu detektora TL znajdującego się za przekładką aluminiową. Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym  $M=1$  wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_1$ , a  $M=2$  na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_2$ . Indeks  $i$  wskazuje na określoną głowicę pomiarową w mierniku.

$C_{Eq}$  – stężenie równowagowe [ $Bq \cdot m^{-3}$ ].

$C_{EqR}$  – stężenie równowagowe radonu [ $Bq \cdot m^{-3}$ ].

$C_{EqT}$  – stężenie równowagowe toronu [ $Bq \cdot m^{-3}$ ].

$C_i$  – stężenie poszczególnych produktów rozpadu radonu lub toronu w powietrzu [ $Bq \cdot m^{-3}$ ].

$C_{Ri}$  – stężenie produktów rozpadu radonu w powietrzu  $i=1, 2, 3, 4$  odpowiednio dla  $^{218}Po$ ,  $^{214}Pb$ ,  $^{214}Bi$  i  $^{214}Po$  [ $Bq \cdot m^{-3}$ ].

$C_{Ti}$  – stężenie produktów rozpadu toronu w powietrzu  $i=1, 2, 3, 4A, 4B$  odpowiednio dla  $^{216}Po$ ,  $^{212}Pb$ ,  $^{212}Bi$ ,  $^{212}Po$  i  $^{208}Tl$  [ $Bq \cdot m^{-3}$ ].

$C_R$  – stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu [ $Bq \cdot m^{-3}$ ].

$C_T$  – stężenie promieniotwórcze toronu w powietrzu [ $Bq \cdot m^{-3}$ ].

$C_\alpha$  – stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu lub toronu w powietrzu [ $\mu J/m^3$ ].

$C_{\alpha f}$  – stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu lub toronu w powietrzu związane z frakcją wolną [ $\mu J/m^3$ ].

$C_{\alpha C}$  – sumaryczne stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu lub toronu w powietrzu związane z frakcją wolną i związaną [ $\mu J/m^3$ ].

$C_{\alpha R}$  – stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu w powietrzu ( $^{218}Po$ ,  $^{214}Pb$ ,  $^{214}Bi$ ,  $^{214}Po$ ) [ $\mu J/m^3$ ].



$C_{\alpha T}$  – stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu toronu w powietrzu ( $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Po}$ ) [ $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ].

$D$  – obciążająca dawka skuteczna związana z produktami rozpadu radonu lub toronu [ $\text{mSv}$ ].

$D_R$ , – obciążająca dawka skuteczna dla produktów rozpadu radonu [ $\text{mSv}$ ].

$D_T$  – obciążająca dawka skuteczna dla produktów rozpadu toronu [ $\text{mSv}$ ].

$E_T(\Delta t)$  – energia promieniowania alfa wyemitowana w określonym przedziale czasowym  $\Delta t$ , przez produkty rozpadu toronu przechwycone przez filtr ( $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Po}$ ) znajdujące się na filtrze [ $\text{MeV}$ ].

$E_{Ri}$  – energia cząstek alfa emitowana przez produkty rozpadu radonu  $i=1, 4$  odpowiednio dla  $^{218}\text{Po}$  i  $^{214}\text{Po}$  [ $\text{MeV}$ ] lub [ $\mu\text{J}$ ].

$E_{Ti}$  – energia cząstek alfa emitowana przez produkty rozpadu toronu  $i=1, 3, 4A$  odpowiednio dla  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  i  $^{212}\text{Po}$  [ $\text{MeV}$ ] lub [ $\mu\text{J}$ ].

$E_{Pi}$  – energia potencjalna alfa związana z produktami rozpadu radonu lub toronu [ $\mu\text{J}$ ].

$E_{PRi}$  – energia potencjalna alfa związana z produktami rozpadu radonu  $i=1, 2, 3, 4$  odpowiednio dla  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Po}$  [ $\mu\text{J}$ ].

$E_{PTi}$  – energia potencjalna alfa związana z produktami rozpadu toronu  $i=1, 2, 3, 4A, 4B$  odpowiednio dla  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Po}$  i  $^{208}\text{Tl}$  [ $\mu\text{J}$ ].

$f$  – zanik termoluminescencji.

$f_p$  – udział frakcji wolnej krótkożyciowych produktów rozpadu radonu.

$F$  – współczynnik filtracji.

$F_R$  – współczynnik równowagi pomiędzy radonem, a produktami jego rozpadu.

$F_T$  – współczynnik równowagi pomiędzy toronem, a produktami jego rozpadu.

$k$  – współczynnik konwersji na dawkę [ $\text{mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ ].

$k_R$  – współczynnik konwersji na dawkę dla produktów rozpadu radonu [ $\text{mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ ].

$k_T$  – współczynnik konwersji na dawkę dla produktów rozpadu toronu [ $\text{mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ ].

$k_1$  – zmienna zredukowana dla testu jednostronnego.

$k_2$  – zmienna zredukowana dla testu dwustronnego.

$K_{MRi}, K_{MTi}$  – współczynniki kalibracji odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu. Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym  $M=1$  wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_1$ , a  $M=2$  na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_2$ . Indeks i wskazuje na określoną głowicę pomiarową w mierniku.

$K_{\gamma MAi}$  – współczynnik kalibracji dla promieniowania gamma określony w stosunku do detektorów znajdujących się bezpośrednio nad filtrem ( $pC/\mu Gy$ ). Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym  $M=1$  wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_1$ , a  $M=2$  na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_2$ . Indeks i wskazuje na określoną głowicę pomiarową w mierniku.

$K_{\gamma MBi}$  – współczynnik kalibracji dla promieniowania gamma określony w stosunku do detektorów znajdujących się za przekładką aluminiową ( $pC/\mu Gy$ ). Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym  $M=1$  wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_1$ , a  $M=2$  na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_2$ . Indeks i wskazuje na określoną głowicę pomiarową w mierniku.

$n_i$  – liczba nuklidów w jednostce objętości  $i=1,2,3,4$  odpowiednio dla  $^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi$  i  $^{214}Po$  w przypadku radonu i  $^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi$  i  $^{212}Po$  w przypadku toronu [ $m^{-3}$ ].

$Q$  – natężenie przepływu powietrza przez filtr [ $l/min$ ].

$R_{Ti}$  – poprawka toronowa obliczona na podstawie sumarycznej energii wyemitowanej przez rozpadające się produkty rozpadu toronu na filtrze ( $^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{212}Po$ ) w określonym czasie:  $R_{T1} = E_T(\Delta t_1)/E_T(\Delta t_2)$ ,  $R_{T2} = E_T(\Delta t_3)/E_T(\Delta t_2)$ .

$S_{1i}$  – sygnał z pierwszego miernika uzyskany podczas detekcji w czasie  $\Delta t_1$ .

$S_{2i}$  – sygnał z drugiego miernika uzyskany podczas detekcji w czasie  $\Delta t_2$ .

$S_{X1Ri}(\Delta t_1)$  – całkowity sygnał związany z obecnością produktów rozpadu radonu na filtrze, gdyby detekcję wykonano w czasie  $\Delta t_1$  za pomocą miernika 1.

$S_{X1Ti}(\Delta t_1)$  – sygnał związany z obecnością produktów rozpadu toronu na filtrze zarejestrowany w czasie  $\Delta t_1$  przez miernik 1.

$S_{X2Ti}(\Delta t_3)$  – sygnał związany z obecnością produktów rozpadu toronu na filtrze w czasie  $\Delta t_3$ , gdyby detekcję wykonano w czasie  $\Delta t_3$  za pomocą miernika 2.

- $S_{X2Ti}(\Delta t4)$  – całkowity sygnał związany z obecnością produktów rozpadu toronu na filtrze, gdyby detekcję wykonano w czasie  $\Delta t4$  za pomocą miernika 2.
- $t_{A1}, t_{A2}$  – czasy rozpoczęcia i zakończenia detekcji za pomocą miernika 1, określane w stosunku do rozpoczęcia pompowania powietrza przez filtr [s],  $\Delta t1: (t_{A1}, t_{A2})$ .
- $t_{B1}, t_{B2}$  – czasy rozpoczęcia i zakończenia detekcji za pomocą miernika 2, określane w stosunku do rozpoczęcia pompowania powietrza przez filtr [s],  $\Delta t2: (t_{B1}, t_{B2})$ .
- $t_E$  – czas ekspozycji [h].
- $t_p$  – czas pompowania, początek pompowania to moment rozpoczęcia całego cyklu pomiarowego w stosunku, do którego należy oceniać czasy detekcji [s].
- $T_{1/2}$  – czas połowicznego rozpadu [s].
- $T_{MAi}$  – bieg własny detektora TL znajdującego się bezpośrednio nad filtrem. Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym  $M=1$  wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t1$ , a  $M=2$  na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t2$ . Indeks i wskazuje na określoną głowicę pomiarową w mierniku.
- $T_{MBi}$  – bieg własny detektora TL znajdującego się w za przekładką aluminiową. Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym  $M=1$  wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t1$ , a  $M=2$  na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t2$ . Indeks i wskazuje na określoną głowicę pomiarową w mierniku.
- $X_{CL}$  – poziom krytyczny oszacowany dla wielkości X.
- $X_{DL}$  – limit detekcji oszacowany dla wielkości X.
- Z – stężenie aerozoli środowiskowych [ $\text{cm}^{-3}$ ].
- $\alpha_M, \beta_M, \sigma_{0Mi}^2$  – wielkości pomocnicze w obliczeniu wariancji sygnałów netto. Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym  $M=1$  wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t1$ , a  $M=2$  na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t2$ . Indeks i wskazuje na określoną głowicę pomiarową w tym mierniku.
- $\gamma_{MABi}$  – poprawka uwzględniająca różnice w czułości detektorów w i-tej głowicy pomiarowej znajdujących się bezpośrednio nad filtrem i oddzielonych przekładką w stosunku do

promieniowania gamma. Indeks M określa zastosowany miernik, przy czym M=1 wskazuje na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_1$ , a M=2 na miernik przeznaczony do detekcji w czasie  $\Delta t_2$ .

$\varepsilon_{Ti}$  – współczynniki podziału wskazujące jaka część rozpadów izotopu z indeksem i-1 prowadzi do powstania izotopu z indeksem i.

$\lambda$  – stała rozpadu promieniotwórczego [ $s^{-1}$ ].

$\lambda_{Ri}$  – stałe rozpadu dla produktów rozpadu radonu i=1,2,3,4 odpowiednio dla  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ .

$\lambda_{Ti}$  – stałe rozpadu dla produktów rozpadu toronu i=1, 2, 3, 4A, 4B odpowiednio dla  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Po}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ .

$\eta$  – niestabilność pracy czytnika.

$\sigma^2$  – wariancja.

$\varphi_i$ ,  $\chi_i$  – parametry pomocnicze przeznaczone do wyliczenia korekt toronowych  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$  [ $\text{MeV}\cdot\text{s}$ ].

$\mathfrak{R}_i$  – liczba zarejestrowanych zliczeń przez licznik ciekłoscyntylacyjny.

# Słownik podstawowych terminów wykorzystywanych w pracy

EEC (Equilibrium Equivalent Concentration) – stężenie równowagowe EEC to stężenie radonu lub toronu w równowadze promieniotwórczej z produktami ich rozpadu, które odpowiadałoby takiemu samemu stężeniu energii potencjalnej alfa jaką miałyby rzeczywista nierównowagowa mieszanina tych nuklidów.

$F_{R/T}$  (współczynnik równowagi) – stosunek stężenia równowagowego do stężenia promieniotwórczego radonu/toronu w powietrzu. Odzwierciedla stopień nierównowagi między mieszką produktów rozpadu, a nuklidem macierzystym. Zależy nie tylko od procesów samorzutnej przemiany jądrowej danego izotopu, ale także od intensywności przewietrzania czy strat spowodowanych usuwaniem promieniotwórczych aerozoli z atmosfery w wyniku dyfuzji, bezwładności czy osadzania grawitacyjnego.

Fracja wolna – niewielkie obiekty o rozmiarach do około 10 nm, które nie związały się z otaczającymi aerozolami środowiskowymi.

$k_{R/T}$  (współczynnik konwersji na dawkę) – współczynnik przeliczeniowy z ekspozycji związanej z oddziaływaniem produktów rozpadu radonu/toronu na obciążającą dawkę skuteczną. Jednostką współczynnika konwersji jest  $mSv/(MJ \cdot h \cdot m^{-3})$ .

Narażenie na radon/toron – narażenie na pochodne radonu/toronu.

PAEC (Potential Alpha Energy Concentration) – stężenie energii potencjalnej alfa krótkożyłowych produktów rozpadu radonu/toronu jest równe sumie energii alfa emitowanych podczas rozpadu izotopów od polonu  $^{218}Po$  aż do izotopu ołowiu  $^{210}Pb$  w przypadku radonu i od polonu  $^{216}Po$  do  $^{208}Pb$  lub  $^{208}Tl$  w przypadku toronu, które znajdują się w określonej jednostce objętości. Jednostką PAEC w układzie SI jest  $J \cdot m^{-3}$ .

Radon – izotop radonu  $^{222}Rn$  występujący w uranowo-radowym szeregu promieniotwórczym.

TL (thermoluminescence) – termoluminescencja.

TLD (thermoluminescence detector) – detektor termoluminescencyjny.

Toron – izotop radonu  $^{220}Rn$  występujący w torowym szeregu promieniotwórczym.

## Spis rysunków

Rys. 1. Procentowy udział poszczególnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej otrzymywanej przez mieszkańca Polski (opracowanie własne na podstawie Atlasu Radiologicznego Polski, 2011) .....	18
Rys. 2. Naturalne szeregi promieniotwórcze uranowo-radowy i torowy z zaznaczonymi produktami rozpadu radonu i toronu (opracowanie własne) .....	23
Rys. 3. Mechanizm emanacji i ekshalacji radonu/toronu z gleby do atmosfery (opracowanie własne).....	27
Rys. 4. Przykładowa zmienność dobową stężenia radonu (pomiar własny) .....	29
Rys. 5. Mechanizm tworzenia się frakcji wolnej i frakcji związanej produktów rozpadu radonu/toronu (opracowanie własne).....	31
Rys. 6. Schemat miernika przeznaczonego do pomiaru stężenia energii potencjalnej produktów rozpadu radonu i toronu (opracowanie własne).....	53
Rys. 7. Aspirator AP-2000 EX i czytnik detektorów TL Harshaw-5500 (zdjęcie własne).....	54
Rys. 8. Zrzut ekranu programu do akwizycji danych, krzywa wyświecania detektorów CaSO <sub>4</sub> :Dy.....	56
Rys. 9. Komora radonowa Śląskiego Centrum Radiometrii GIG-PIB .....	68
Rys. 10. Widmo promieniowania gamma chlorku toru stosowanego jako źródło toronu .....	69
Rys. 11. Zmiany stężenia energii potencjalnej alfa w komorze o pojemności 17 m <sup>3</sup> w wyniku stałego transferu toronu ze źródła z szybkością 150 Bq/s .....	71
Rys. 12. Zmiany stężenia energii potencjalnej alfa w komorze o pojemności 17 m <sup>3</sup> w wyniku stałego transferu toronu ze źródła z szybkością 150 Bq/s, w sytuacji, kiedy między 80 a 90 godziną działały urządzenia filtrujące z łącznym natężeniem przepływu 4 l/min i wydajnością filtracji 100%.....	72
Rys. 13. Zmiany stężenia energii potencjalnej alfa w komorze o pojemności 17 m <sup>3</sup> w wyniku stałego transferu radonu ze źródła z szybkością 0,35 Bq/s, w sytuacji, kiedy między 700 a 710 godziną działały urządzenia filtrujące z łącznym natężeniem przepływu 4 l/min i wydajnością filtracji 100% .....	73
Rys. 14. Widma otrzymane w trakcie jednoczesnego pomiaru produktów rozpadu radonu zebranych na filtrze nieosłoniętym oraz na filtrze za ekranem dyfuzyjnym.....	77
Rys. 15. Widma otrzymane w trakcie jednoczesnego pomiaru produktów rozpadu radonu zebranych na filtrze nieosłoniętym oraz na filtrze umieszczonym w cyklonie .....	78
Rys. 16. Widma otrzymane w trakcie jednoczesnego pomiaru produktów rozpadu radonu zebranych na filtrze nieosłoniętym oraz na filtrze umieszczonym w mierniku alfa .....	79

Rys. 17. Wyznaczone współczynniki kalibracyjne stosowanych mierników dla różnych materiałów filtracyjnych.....	81
Rys. 18. Porównanie współczynników kalibracji mierników otrzymanych w atmosferze radonowej i toronowej .....	83
Rys. 19. Zrzut ekranu programu Harshaw .....	85
Rys. 20. Schemat sieci wentylacyjnej w Zabytkowej Kopalni Srebra z zaznaczonymi punktami pomiarowymi .....	89
Rys. 21. Porównanie dawek obliczonych na podstawie różnych współczynników konwersji	92
Rys. 22. Mapa poziomu 30 m KD Barbara z zaznaczonym punktem pomiarowym.....	94
Rys. 23. Mapa poziomu 46 m KD Barbara z zaznaczonymi punktami pomiarowymi .....	94
Rys. 24. Porównanie dawek obliczonych na podstawie różnych współczynników konwersji	97
Rys. 25. Jednoczesny pomiar stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu (zdjęcie własne).....	100
Rys. 26. Porównanie dawek obliczonych na podstawie różnych współczynników konwersji .....	103
Rys. 27. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą różnych urządzeń w I okresie pomiarowym .....	105
Rys. 28. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą różnych urządzeń w II okresie pomiarowym .....	105
Rys. 29. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą różnych urządzeń w III okresie pomiarowym .....	106

## Spis tabel

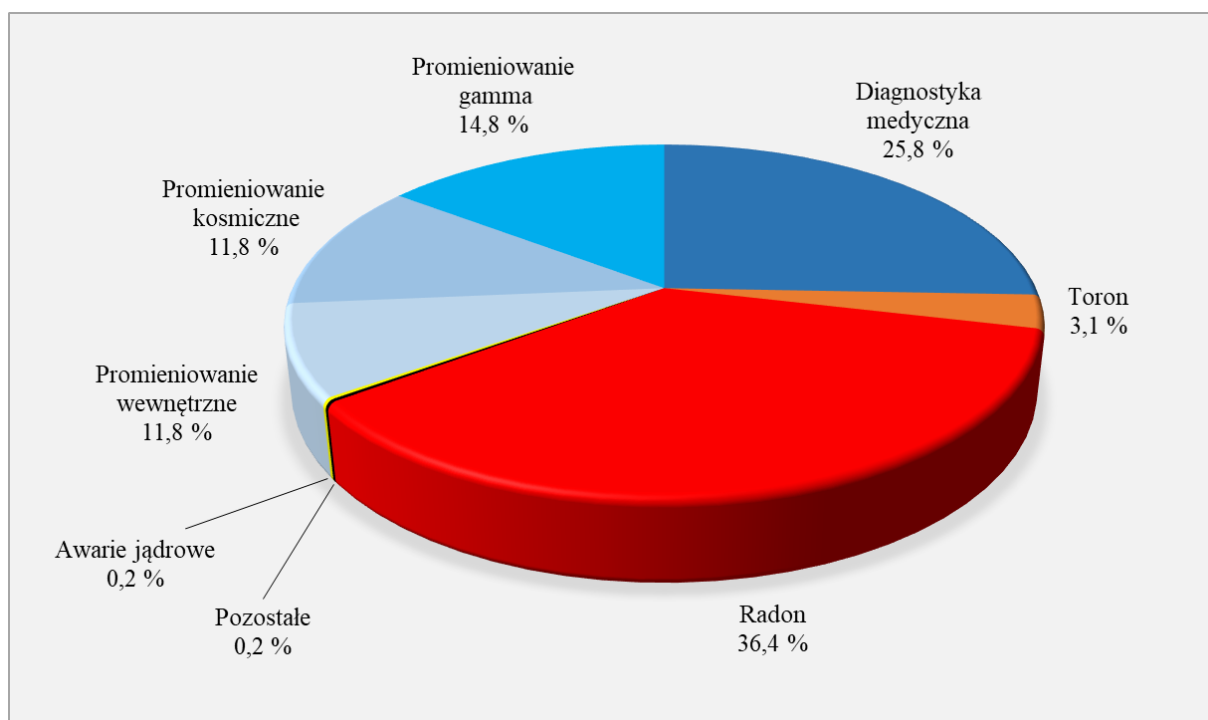
Tabela 1. Charakterystyka produktów rozpadu radonu i toronu (Nuclear data, 2024) .....	25
Tabela 2. Energie potencjalne alfa produktów rozpadu radonu i toronu (Nuclear data, 2024).....	26
Tabela 3. Obowiązujące i rekomendowane współczynniki konwersji na dawkę.....	42
Tabela 4. Interwały czasowe pobierania próbki zaproponowane przez różnych badaczy .....	47
Tabela 5. Interwały czasowe pobierania próbki zaproponowane przez różnych badaczy .....	47
Tabela 6. Interwały czasowe pobierania próbki zaproponowane przez różnych badaczy .....	48
Tabela 7. Dostępne urządzenia stosowane do pomiaru pochodnych radonu/toronu .....	51
Tabela 8. Definicja interwałów czasowych pomiaru.....	58
Tabela 9. Wartości stałych (Nuclear data, 2024).....	60
Tabela 10. Możliwości pomiarowe miernika określone dla typowych wartości zastosowanego układu pomiarowego.....	67
Tabela 11. Stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu toronu wykonanego dla tych samych próbek z uwzględnieniem dwóch lub trzech interwałów czasowych.....	76
Tabela 12. Sekwencja pomiarowa stężeń produktów rozpadu radonu i toronu .....	76
Tabela 13. Udział frakcji wolnej w komorze radonowej.....	77
Tabela 14. Wyznaczone współczynniki kalibracji detektorów dla produktów rozpadu radonu .....	80
Tabela 15. Wyznaczone współczynniki kalibracji detektorów dla produktów rozpadu toronu .....	82
Tabela 16. Porównanie wartości współczynników kalibracyjnych otrzymanych w atmosferze radonowej i toronowej .....	83
Tabela 17. Wyznaczone współczynniki kalibracji detektorów dla promieniowania gamma...84	
Tabela 18. Stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu.....	90
Tabela 19. Obliczone dawki skuteczne dla pracowników Zabytkowej Kopalni Srebra w Tarnowskich Górach (k-współczynniki konwersji w $mSv/(mJ \cdot m^{-3} \cdot h)$ , $D_R$ i $D_T$ dawki odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu) .....	91
Tabela 20. Stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu w KD Barbara .....	96
Tabela 21. Obliczone dawki skuteczne dla pracowników KD Barbara (k-współczynniki konwersji w $mSv/(mJ \cdot m^{-3} \cdot h)$ , $D_R$ i $D_T$ dawki odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu).....	98



Tabela 22. Pomiar stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu w wybranych obiektach w Rzymie .....	101
Tabela 23. Obliczone dawki skuteczne dla pracowników muzeów (k-współczynniki konwersji w $\text{mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})$ , $D_R$ i $D_T$ dawki odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu)...	102

# 1. Wprowadzenie

Szacuje się, że roczna dawka skuteczna promieniowania jonizującego otrzymywana przez mieszkańca Polski wynosi 3,3 milisiwerty (mSv). Składowa tej dawki to, zarówno promieniowanie radionuklidów naturalnych (radon, wtórne promieniowanie kosmiczne, promieniowanie gamma) jak i promieniowanie pochodzenia sztucznego (medycyna, przemysł). Procentowy udział poszczególnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej przedstawiono na rys. 1 (Radiologiczny Atlas Polski, 2011).



Rys. 1. Procentowy udział poszczególnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej otrzymywanej przez mieszkańca Polski (opracowanie własne na podstawie Atlasu Radiologicznego Polski, 2011)

Największy wkład do dawki otrzymywanej przez przeciętnego mieszkańca Polski od naturalnych źródeł promieniowania wnoszą nuklidy związane z radonem. Udział samego radonu jest niewielki, w porównaniu z produktami jego rozpadu. Według raportu ICRP (ICRP, 2017) sięga on 2% dla miejsc pracy w budynkach i 5% dla podziemnych zakładów górniczych. Zarówno radon jak i toron są gazami szlachetnymi, co obniża ich zdolność do depozycji w układzie oddechowym. Jednak w przypadku, kiedy do płuc dostają się produkty ich rozpadu, takie ograniczenia nie mają miejsca. Są to bowiem metale, a efektywność i miejsce ich depozycji zależy od rozmiarów aerozoli, z którymi utworzyły kompleksy w środowisku. Większe obiekty mogą osadzać się w górnych partiach układu oddechowego i być usunięte z orga-

nizmu w wyniku oczyszczania się dróg oddechowych, natomiast mniejsze cząstki mogą przedostawać się, aż do pęcherzyków w płucach. Zdeponowane w układzie oddechowym aerozole promieniotwórcze są źródłem promieniowania alfa, beta i gamma. W przypadku skażeń wewnętrznych niebezpieczne jest zwłaszcza promieniowanie alfa, ze względu na wysoki liniowy współczynnik przekazania energii, tzw. LET (Linear Energy Transfer). Promieniowanie alfa może powodować uszkodzenia komórek i w konsekwencji indukcję nowotworu. Ryzyko wystąpienia raka płuc u osób narażonych na radon, a szczególnie u osób narażonych zawodowo na ten czynnik, jest bardzo duże. Przypadki śmiertelności z powodu chorób układu oddechowego u górników podziemnych opisywano już w XVI wieku (Agricola, 1556). Jednakże dopiero w 1913 r. H.E. Müller i w 1921 r. M. Uhlig powiązali zachorowalność na raka płuc z obecnością „emanacji radu”. W 1939 r. Zygmunt Peller opisał występowanie raka płuc u górników z miejscowości Schneeberg i Joachimsthal. W połowie lat 50 ubiegłego wieku ostatecznie uznano, że to nie sam radon, lecz produkty jego rozpadu są przyczyną powstawania raka płuc (Bale i Shapiro, 1956).

Obecność radonu i toronu w glebie, skałach, wodzie czy powietrzu wynika z występowania w skorupie ziemskiej uranu  $^{238}\text{U}$  i toru  $^{232}\text{Th}$ , które są protoplastami naturalnych szeregów promieniotwórczych. Prowadzenie prac związanych z wydobywaniem kopalin sprawia, że powstający w wyniku przemian promieniotwórczych radon lub toron mogą z większą swobodą migrować ze skał do wydrążonych wyrobisk. Zatem najbardziej narażone na te nuklidy są osoby pracujące pod ziemią, w kopalniach, gdzie dodatkowo wentylacja ma ograniczoną efektywność, czy w pomieszczeniach zlokalizowanych na poziomie parteru lub w piwnicach, blisko podłoża. Przyczyną obecności radonu/toronu w atmosferze może też być zwiększone stężenie izotopu macierzystego radonu, szczególnie w materiałach powstających w wyniku różnych procesów technologicznych, tak jak na przykład ma to miejsce w stacjach uzdatniania wody. Do wspomnianych wcześniej podziemnych miejsc pracy, w których występuje narażenie na radon/toron, należy dodać głębinowe trasy turystyczne. W ostatnich latach w Polsce popularność takich tras bardzo wzrosła. Około 200 działających tras zlokalizowanych jest głównie w obszarach występowania formacji skalnych o podwyższonej naturalnej promieniotwórczości (Sudety, Karpaty, Góry Świętokrzyskie, Wyżyna Lubelska). Poważne zagrożenie, ze względu na radon, może występować we wszelkiego rodzaju ośrodkach sanatoryjnych oferujących różne formy subterraneoterapii, zlokalizowane w nieczynnych wyrobiskach górniczych, a także wykorzystujące wody radonowe w celach leczniczych. Stężenia radonu w takich miejscach mogą

sięgać nawet kilkuset kilobekereli na metr sześcienny ( $\text{Bq/m}^3$ ). Tak wysokie stężenia przekładają się na wyższe dawki skuteczne, otrzymywane przez osoby przebywające w takich miejscach. O ile dawka skuteczna otrzymana przez osobę z ogółu ludności, przebywającą w miejscu o podwyższonym stężeniu radonu, może być zwykle pominięta ze względu na krótki czas ekspozycji, to dawki otrzymywane przez pracowników są wielokrotnie wyższe i nie mogą zostać zaniedbane. W takich przypadkach należy ocenić dawkę skuteczną, co z kolei pozwala na sformułowanie zaleceń i działań zmierzających do ograniczenia narażenia.

W celu oceny zagrożeń radonowych i toronowych prowadzi się najczęściej pomiary stężenia radonu/toronu w powietrzu, głównie za pomocą detektorów śladowych. Jednakże, aby ocenić dawkę skuteczną na podstawie pomiarów stężenia radonu w powietrzu konieczne jest przyjęcie rekomendowanej wartości współczynnika równowagi między radonem, a produktami jego rozpadu (F). Rekomendowana przez ICRP wartość tego współczynnika wynosi 0,2 dla podziemnych kopalń i 0,4 w przypadku jaskiń. Jednak zastosowanie powyższych współczynników równowagi, może być źródłem znacznego niedoszacowania lub przeszacowania, ponieważ jak pokazują badania, wartość współczynnika równowagi w polskich podziemnych kopalniach może się zmieniać w zakresie 0,1-0,9 (Skowronek, 1999; Grygier, 2024). Znacznie mniejszą niepewnością są obarczone pomiary stężenia energii potencjalnej alfa (PAEC). W krajach takich jak Polska czy USA zaleca się prowadzenie w podziemnych zakładach górniczych właśnie oznaczeń stężenia energii potencjalnej alfa (OSHA, 2022; ATSDR, 2022; Rozporządzenie, 2016). W porównaniu do pomiarów wyłącznie produktów rozpadu radonu, monitorowanie jednocześnie zagrożeń radonowych i toronowych jest znacznie bardziej skomplikowane i dlatego w ramach rutynowego monitoringu na ogół nie prowadzi się takich badań. Na rynku dostępnych jest wiele rodzajów detektorów mierzących stężenie radonu/toronu, ale ta informacja nie jest wystarczająca do poprawnego oszacowania rzeczywistej dawki promieniowania. Pożądaną mierzoną wielkością jest stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Od kilku dekad coraz częściej wykonuje się pomiary toronu w celu oszacowania udziału tego nuklidu w narażeniu ludzi na naturalnie występującą promieniotwórczość. Pomiary produktów rozpadu toronu są dość skomplikowane i wykonuje się je rzadko, choć dałyby one najlepsze oszacowanie zagrożenia. Istnieje pewna możliwość obliczania dawek skutecznych, w oparciu o stężenie radonu/toronu, jednak wymaga to znajomości współczynnika równowagi. Takie podejście do wyznaczania dawki obarczone jest dużą niepewnością pomiaru. Prowadzenie pomiarów produktów rozpadu radonu i toronu jest zasadne w mieszkaniach, miejscach pracy, stacjach uzdatniania wód, jaskiniach turystycznych i innych miejscach zlokalizowanych pod ziemią.

W Polsce pomiary stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu od wielu lat przeprowadza się w podziemnych kopalniach węgla za pomocą specjalnych urządzeń zwanych miernikami ALFA. Urządzenia te wyposażone są w detektory termoluminescencyjne (TLD), których odczyt dostarcza informacji o potencjalnej energii alfa, bez konieczności badania współczynnika równowagi między radonem, a produktami jego rozpadu. W przedstawionej pracy zmodyfikowano istniejącą metodę tak, aby możliwe było zastosowanie tych urządzeń do jednoczesnego pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa radonu i toronu, co jest podstawą do wyliczenia dawek promieniowania.

Po analizie zasadności prowadzenia jednocześnie pomiarów produktów rozpadu radonu, jak i toronu, sformułowano następujące cele niniejszej pracy.

**Cel naukowy:** optymalizacja procedury monitoringu radiacyjnego, techniki pobierania próbek w miejscach pracy oraz dobór czasu prowadzenia kontroli umożliwiający jednoczesny pomiar ekspozycji na produkty rozpadu radonu i toronu.

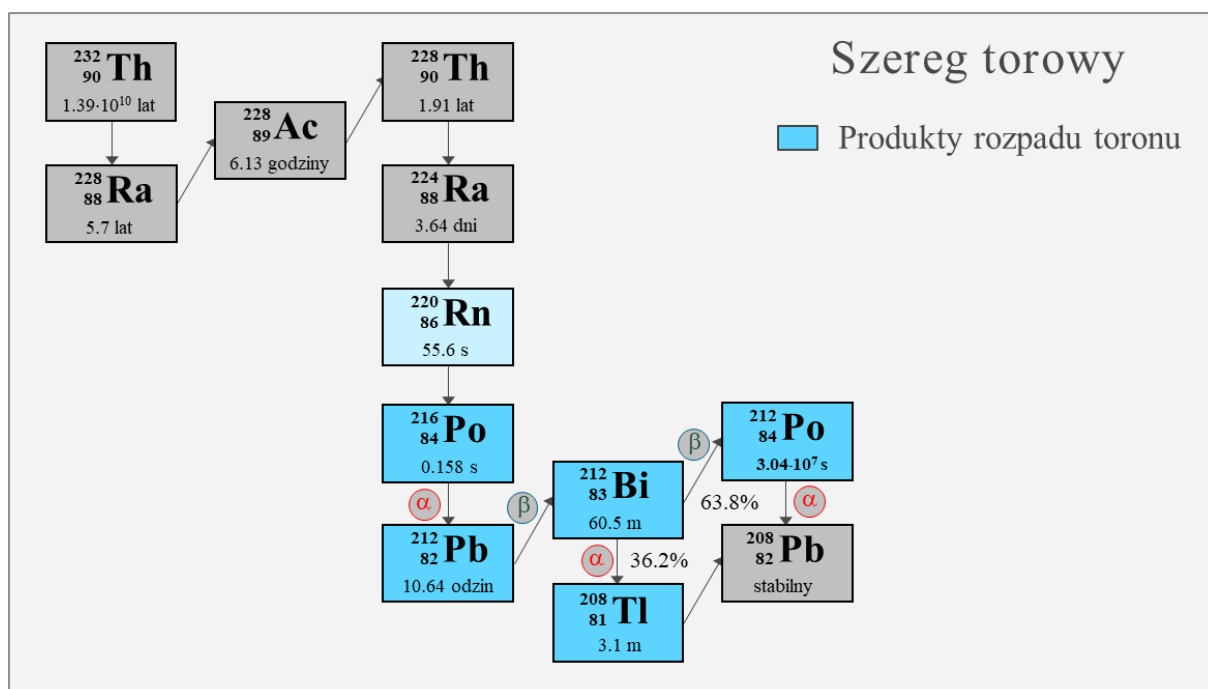
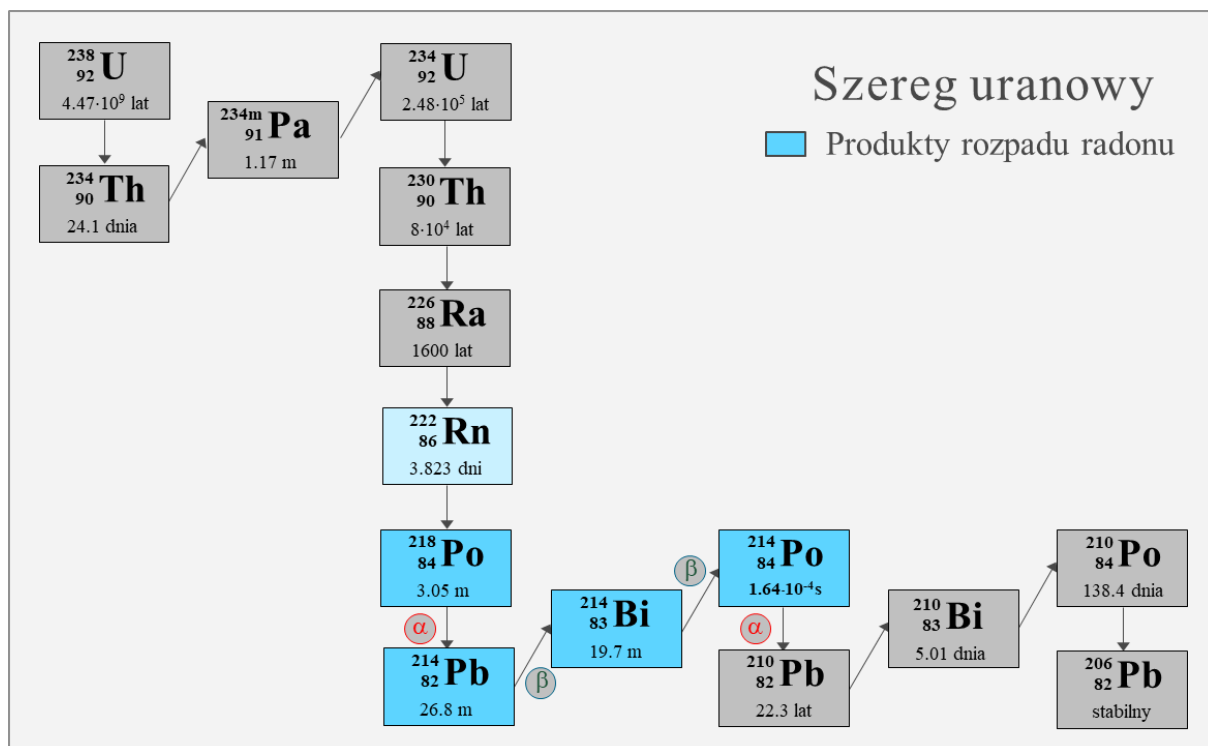
**Cel uytlitarny:** oszacowanie dawek związanych z wniknięciem drogą oddechową produktów rozpadu radonu i toronu na stanowiskach pracy, ocena zagrożenia związanego z obecnością radonu, toronu i ich produktów rozpadu w różnych obiektach i wskazanie działań ograniczających zagrożenie.

## 2. Radon i toron

W rozdziale zawarto podstawowe informacje na temat radonu i toronu oraz produktów ich rozpadu, zachowania się tych izotopów w atmosferze, procesów formowania się aerozoli promieniotwórczych oraz ich wpływu na zdrowie osób narażonych na ich działanie. Ponadto omówiono wielkości, które są kluczowe do ilościowej oceny zagrożenia radiacyjnego.

### 2.1. Radon i toron. Informacje podstawowe.

Izotop radonu  $^{220}\text{Rn}$ , zwany toronem, został odkryty w roku 1899 przez brytyjskiego naukowca R.B. Owensa i Nowozelandczyka Ernesta Rutherforda. Natomiast radon  $^{222}\text{Rn}$  został odkryty rok później przez niemieckiego naukowca Friedricha E. Dorna i został nazwany emanacją radu. Radon jest naturalnie występującym nuklidem promieniotwórczym. Powstaje w wyniku przemian jądrowych zachodzących w naturalnych szeregach promieniotwórczych. Istnieją trzy izotopy radonu, które mogą stanowić zagrożenie:  $^{222}\text{Rn}$  (zwany radonem),  $^{220}\text{Rn}$  (zwany toronem) oraz  $^{219}\text{Rn}$  (zwany aktynonem). Pierwszy z izotopów – radon, powstaje w wyniku rozpadów szeregu uranowo-radowego. Protoplastą tego szeregu jest uran  $^{238}\text{U}$ , którego czas połowicznego rozpadu wynosi 4,5 mld lat, a izotopem stabilnym zamykającym ten szereg jest ołów  $^{206}\text{Pb}$ . Szereg uranowo – aktynowy rozpoczyna się izotopem uranu  $^{235}\text{U}$ , o czasie połowicznego rozpadu 0,7 mld lat, a kończy się stabilnym izotopem ołowiu  $^{207}\text{Pb}$ . W tym szeregu w wyniku rozpadu promieniotwórczego radu  $^{223}\text{Ra}$  powstaje aktynon ( $^{219}\text{Rn}$ ). Toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) powstaje w wyniku przemian zachodzących w szeregu torowym (rys. 2). Czas połowicznego rozpadu jąder toru  $^{232}\text{Th}$  wynosi 14 mld lat. Szereg ten zamyka stabilnym izotopem ołowiu  $^{208}\text{Pb}$ . Symbole  $\alpha$  i  $\beta$  na rys. 2 oznaczają sposób rozpadu jądra atomowego, a czas, to czas połowicznego rozpadu jąder atomowych. Ze względu na wagę poszczególnych izotopów radonu (radon, toron, aktynon) stanowiących zagrożenie dla osób z ogółu ludności czy pracowników, w grupie tej pominąć można aktynon.



Rys. 2. Naturalne szeregi promieniotwórcze uranowo-radowy i torowy z zaznaczonymi produktami rozpadu radonu i toronu (opracowanie własne)

Radon jest gazem szlachetnym, występuje na 0 i II stopniu utlenienia. Jest radioaktywny, bezbarwny, bezwonny i niepalny. Jego liczba atomowa to 86. W układzie okresowym znajduje się on w 6 okresie, w grupie 18. Gęstość radonu wynosi  $9,07 \text{ kg/m}^3$  (Handbook of Chemistry

and Physics, 2014). Oprócz wyżej wymienionych izotopów radonu występujących naturalnie, znanych jest około 30 innych wytworzonych w warunkach laboratoryjnych.

Produktami rozpadu izotopów radonu i toronu są izotopy metali ciężkich, które mają zdolność do łączenia się z istniejącymi w atmosferze aerozolami. Produkty rozpadu radonu można podzielić na dwie grupy: krótkożyciowe, których czas połowicznego rozpadu jest krótszy niż 30 min i długożyciowe, o czasie połowicznego rozpadu dłuższym niż 30 min. Na rys. 2 zaznaczono krótkożyciowe produkty rozpadu radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) i produkty rozpadu toronu ( $^{220}\text{Rn}$ ), które zaliczają się do nuklidów tworzących tzw. zagrożenie radonowe. Do krótkożyciowych produktów rozpadu radonu należą: polon  $^{218}\text{Po}$  (RaA) o czasie połowicznego rozpadu  $T_{1/2}=3,1$  min, ołów  $^{214}\text{Pb}$  (RaB) o  $T_{1/2}=26,8$  min, bizmut  $^{214}\text{Bi}$  (RaC), którego czas połowicznego rozpadu wynosi 19,9 min oraz polon  $^{214}\text{Po}$  (RaC') o  $T_{1/2}=164,3$   $\mu\text{s}$ . Długożyciowe produkty rozpadu radonu to: ołów  $^{210}\text{Pb}$  (RaD,  $T_{1/2}=22,2$  lat), bizmut  $^{210}\text{Bi}$  (RaE,  $T_{1/2}=5$  dni) i polon  $^{210}\text{Po}$  (RaF,  $T_{1/2}=138,4$  dni). W przypadku toronu, ze względu na zagrożenie, najważniejszym nuklidem w tym szeregu jest izotop ołowiu  $^{212}\text{Pb}$  (ThB),  $T_{1/2}=10,64$  h. Pozostałe produkty rozpadu toronu to: polon  $^{216}\text{Po}$  (ThA),  $T_{1/2}=0,145$  s, bizmut  $^{212}\text{Bi}$  (ThC),  $T_{1/2}=60,55$  min, polon  $^{212}\text{Po}$  (ThC'),  $T_{1/2}=0,299$   $\mu\text{s}$  oraz tal  $^{208}\text{Tl}$  (ThC''),  $T_{1/2}=3,05$  min. W tabeli 1 i 2 zebrano podstawowe dane dotyczące produktów rozpadu radonu i toronu.



Tabela 1. Charakterystyka produktów rozpadu radonu i toronu (Nuclear data, 2024)

Izotop promieniotwórczy	Typ przemiany	Wydajność absolutna (%)	Energia (MeV)	Stała rozpadu ( $s^{-1}$ )
$^{218}_{84}\text{Po}(\text{RaA})$	$\alpha$	100,0	6,002	$\lambda_{R1}=3,727 \cdot 10^{-3}$
$^{214}_{82}\text{Pb}(\text{RaB})$	$\beta$	48,9	0,672	$\lambda_{R2}=0,431 \cdot 10^{-3}$
	$\beta$	42,2	0,729	
	$\beta$	6,3	1,024	
	X	8,0	0,077	
	$\gamma$	7,4	0,242	
	$\gamma$	19,3	0,295	
	$\gamma$	37,6	0,352	
$^{214}_{83}\text{Bi}(\text{RaC})$	$\beta$	5,7	1,068	$\lambda_{R3}=0,581 \cdot 10^{-3}$
	$\beta$	8,2	1,425	
	$\beta$	17,0	1,507	
	$\beta$	17,8	1,542	
	$\beta$	7,4	1,894	
	$\beta$	18,2	3,275	
	$\gamma$	46,1	0,609	
	$\gamma$	15,1	1,120	
	$\gamma$	5,8	1,238	
	$\gamma$	15,4	1,764	
$^{214}_{84}\text{Po}(\text{RaC}')$	$\alpha$	100,0	7,687	$\lambda_{R4}=0,422 \cdot 10^4$
$^{216}_{84}\text{Po}(\text{ThA})$	$\alpha$	100,0	6,288	$\lambda_{T1}=4,780$
$^{212}_{82}\text{Pb}(\text{ThB})$	$\beta$	5,2	0,159	$\lambda_{T2}=1,810 \cdot 10^{-5}$
	$\beta$	82,5	0,3345	
	$\beta$	12,3	0,574	
	X	5,9	0,011	
	X	27,9	0,080	
	$\gamma$	43,3	0,239	
$^{212}_{83}\text{Bi}(\text{ThC})$	$\alpha$	25,1	6,051	$\lambda_{T3}=1,908 \cdot 10^{-4}$
	$\alpha$	9,7	6,090	
	$\beta$	55,5	2,254	
	$\gamma$	6,6	0,727	
$^{212}_{84}\text{Po}(\text{ThC}')$	$\alpha$	100,0	8,784	$\lambda_{T4A}=0,232 \cdot 10^7$
$^{208}_{81}\text{Tl}(\text{ThC}'')$	$\beta$	24,5	1,293	$\lambda_{T4B}=3,813 \cdot 10^{-3}$
	$\beta$	21,8	1,526	
	$\beta$	48,7	1,803	
	$\gamma$	6,3	0,277	
	$\gamma$	22,6	0,511	
	$\gamma$	84,5	0,583	
	$\gamma$	12,4	0,861	

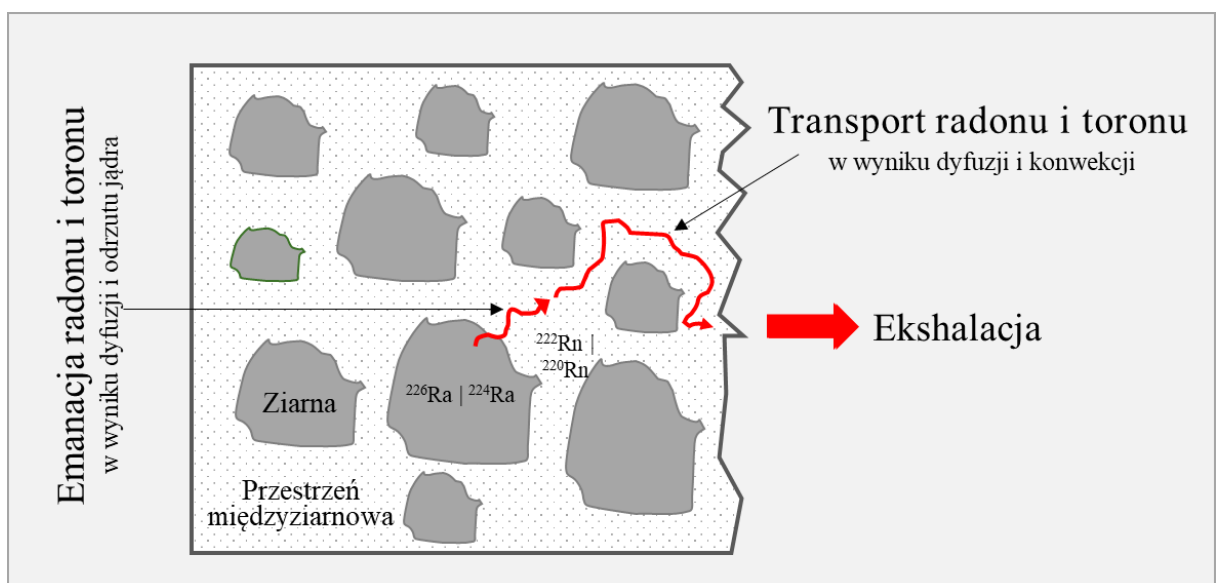
Tabela 2. Energie potencjalne alfa produktów rozpadu radonu i toronu (Nuclear data, 2024)

Izotop promieniotwórczy	Energia cząstek alfa emitowanych podczas przemiany promieniotwórczej		Energia potencjalna alfa pojedynczego nuklidu ( $\mu\text{J}$ )
	(MeV)	( $\mu\text{J}$ )	
$^{218}_{84}\text{Po}(\text{RaA})$	$E_{R1}=6,002$	$E_{R1}=0,962 \cdot 10^{-6}$	$E_{PR1}=E_{R1}+E_{R4}=2,193 \cdot 10^{-6}$
$^{214}_{82}\text{Pb}(\text{RaB})$	-	-	$E_{PR2}=E_{R4}=1,232 \cdot 10^{-6}$
$^{214}_{83}\text{Bi}(\text{RaC})$	-	-	$E_{PR3}=E_{R4}=1,232 \cdot 10^{-6}$
$^{214}_{84}\text{Po}(\text{RaC}')$	$E_{R4}=7,687$	$E_{R4}=1,232 \cdot 10^{-6}$	$E_{PR4}=E_{R4}=1,232 \cdot 10^{-6}$
$^{216}_{84}\text{Po}(\text{ThA})$	$E_{T1}=6,778$	$E_{T1}=1,086 \cdot 10^{-6}$	$E_{PT1}=E_{T1}+0,359 \cdot E_{T3}+0,641 \cdot E_{T4A}=2,337 \cdot 10^{-6}$
$^{212}_{82}\text{Pb}(\text{ThB})$	-	-	$E_{PT2}=0,359 \cdot E_{T3}+0,641 \cdot E_{T4A}=1,251 \cdot 10^{-6}$
$^{212}_{83}\text{Bi}(\text{ThC})$	$E_{T3}=6,061$	$E_{T3}=0,971 \cdot 10^{-6}$	$E_{PT3}=0,359 \cdot E_{T3}+0,641 \cdot E_{T4A}=1,251 \cdot 10^{-6}$
$^{212}_{84}\text{Po}(\text{ThC}')$	$E_{T4A}=8,787$	$E_{T4A}=1,407 \cdot 10^{-6}$	$E_{PT4A}=E_{T4A}=1,407 \cdot 10^{-6}$
$^{208}_{81}\text{Tl}(\text{ThC}'')$	-	-	$E_{PT4B}=0$

## 2.2. Radon i toron w środowisku

Radon i toron powstałe w skałach w wyniku rozpadu promieniotwórczego izotopów macierzystych mogą się z nich wydostawać, w wyniku konwekcji lub dyfuzji, stając się zagrożeniem dla zdrowia ludzi. Radon przedostaje się do atmosfery głównie na granicy faz gleba – powietrze. Proces uwalniania się radonu przedstawiono na rys. 3. Zjawisko wydostawania się radonu z ziaren skalnych do porów nazywa się emanacją. Współczynnik emanacji jest wielkością bezwymiarową, wyrażoną przez stosunek ilości radonu, który wydostaje się ze ziaren skalnych do całkowitej ilości radonu, powstałego wewnątrz tej struktury (Hahn i Müller, 1923; Tanner, 1964). Emanacja radonu z litej skały może odbywać się przez dyfuzję w fazie stałej, odrzut bezpośredni, odrzut pośredni i efekt nokautu (De Wayne i Green, 2012). Ponieważ prawdopodobieństwo dyfuzji radonu z minerałów jest bardzo małe, proces ten ma znikomy wkład do całkowitej emanacji radonu ze skał. Radon migruje ze skał głównie w wyniku odrzutu bezpośredniego. W wyniku rozpadu izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{224}\text{Ra}$  powstałe atomy radonu i toronu o energii kinetycznej równej odpowiednio 83 keV i 123 keV, przemieszczają się od miejsca ich powstania, aż do momentu zdeponowania ich energii w ośrodku. Średnia odległość odrzutu atomu radonu w porach wypełnionych gazem wynosi około 60  $\mu\text{m}$  (Tanner, 1980). Raportowane wartości emanacji radonu w glebie w wyniku odrzutu bezpośredniego atomu wynoszą od 10% do 50% całkowitej emanacji. Dla toronu wartość ta jest około 5 razy mniejsza. Trzeci sposób ucieczki radonu ze skały to odrzut pośredni. Zjawisko to ma miejsce wówczas, gdy

powstający atom radonu posiada energię wystarczającą, aby przedostać się przez przestrzeń porową do przeciwległego ziarna, gdzie powstają kieszenie z osadzonym radonem. Prawdopodobieństwo dyfuzji radonu osadzonego w ziarnie do przestrzeni porowej jest jednak bardzo małe. Wyjaśnienie czwartego zjawiska – nokautu, zaproponowali Zimen i Mertens (1971). Uważali oni, że przez krótki czas po osadzeniu atomu w kieszeni, współczynnik dyfuzji jest tego samego rzędu wielkości, co przewodność cieplna, dzięki czemu atom radonu może ponownie wejść do przestrzeni międzyziarnowej. Jeśli w wyniku opisanego zjawiska radon zdoła opuścić ziarno do przestrzeni porowej, gaz musi zostać przetransportowany przez pory, tak aby jakaś jego część dotarła na powierzchnię zanim ulegnie rozpadowi. Transport radonu/toronu może odbywać się na dwa sposoby: dyfuzję (opisaną prawem Ficka) i konwekcję. Na migrację radonu wpływ ma wiele czynników: rodzaj skały, geometria porów, współczynnik dyfuzji czy czas połowicznego rozpadu. Migracja radonu zależy przede wszystkim od procesów fizycznych, a nie chemicznych (Zimen i Mertens, 1971). Zjawisko wydostawania się radonu z przestrzeni porowej na zewnątrz materiału nosi nazwę ekshalacji i jest to ostatni etap przedostawania się radonu ze skał do atmosfery. Współczynnik ekshalacji jest iloczynem współczynnika emanacji, zawartości radu w skale macierzystej, gęstości materiału, stałej rozpadu promieniotwórczego oraz długości dyfuzji (Nazaroff i Nero, 1988). W ujęciu makroskopowym określa aktywność radonu lub toronu, która jest transferowana przez określoną powierzchnię materiału w jednostce czasu do atmosfery. Mechanizmy emanacji i ekshalacji opisane powyżej przedstawiono w sposób graficzny na rys. 3.

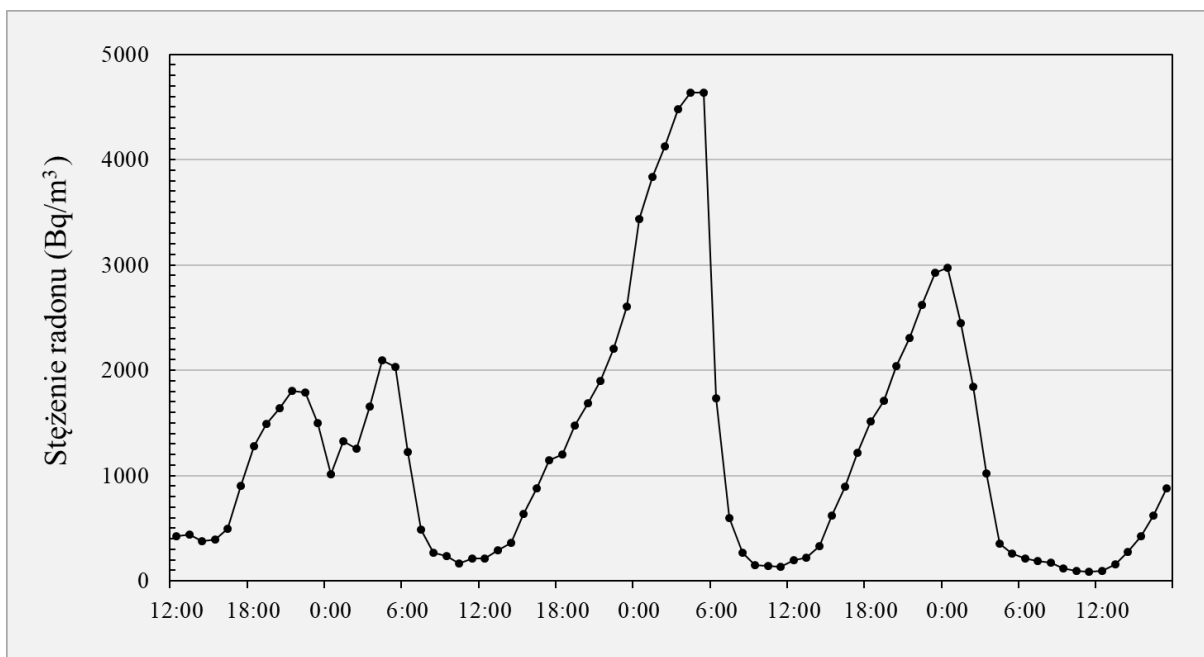


Rys. 3. Mechanizm emanacji i ekshalacji radonu/toronu z gleby do atmosfery (opracowanie własne)

Według Porstendörfera średni współczynnik ekshalacji z gleby do atmosfery wynosi  $0,026 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  dla radonu i  $1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  dla toronu. Wyliczone współczynniki są zgodne z wartościami otrzymanymi w wyniku bezpośrednich pomiarów (Crosier, 1969, Wilkening i inni, 1972; Porstendörfer. J. 1994).

Stężenie radonu/toronu zależy od wielu czynników. Nieco inne zachowania obserwuje się w przestrzeni zamkniętej, a inne w otwartej atmosferze. Stężenie radonu opisane jest głównie dyfuzją turbulentną i ograniczone jest rozpadem promieniotwórczym. Do czynników wpływających na stężenie radonu w wolnej przestrzeni należą: budowa geologiczna determinująca współczynniki emanacji i ekshalacji, wysokość nad poziomem gruntu, czas (obserwuje się zmiany dobowe i sezonowe) oraz warunki meteorologiczne. Jacobi i Andre (1963) oszacowali pionową koncentrację radonu w powietrzu. Stężenie radonu na określonej wysokości może się zmieniać w przekroju poziomym nawet 100-krotnie, w zależności od różnych warunków zachodzących w atmosferze. Stężenie radonu i toronu maleje wraz ze wzrostem odległości od powierzchni gruntu, przy czym z uwagi na bardzo krótki okres połowicznego rozpadu toronu, jego stężenie na wysokości powyżej 1 m jest bardzo małe. Obserwuje się zmienność sezonową stężenia radonu, choć różne dane pokazują różne tendencje. Niektórzy autorzy zmierzili maksymalne stężenia w miesiącach letnich, a minimalne w zimowych, a inni wręcz odwrotnie (Harley, 1978; Iida i inni, 1996; Sesana i inni, 2003). Obserwowane są także dobowe zmiany stężenia radonu tuż przy gruncie. Przy wietrznych i pochmurnych warunkach atmosferycznych odnotowuje się mniejsze wahania w ciągu doby, niż w dni ciepłe i słoneczne. Szacuje się, że średnie roczne stężenie radonu w powietrzu atmosferycznym wynosi od kilku do kilkunastu bekereli w metrze sześciennym, a średni współczynnik równowagi między radonem, a produktami jego rozpadu wynosi 0,6 (Achery, 1990; Porstendörfer, 1994; Porstendörfer i inni, 1999).

Generalnie stężenie radonu/toronu i ich pochodnych jest większe wewnątrz pomieszczeń niż w otwartej przestrzeni. Spowodowane jest to przede wszystkim brakiem dopływu świeżego powietrza, a także dodatkowym źródłem radonu jakim mogą być materiały budowlane. Radon przedostaje się do pomieszczeń głównie z gruntu rzadziej ze ścian. Zatem stężenie radonu wewnątrz pomieszczenia zależy od wydajności źródła oraz od efektywności wentylacji. Jednak i tutaj daje się obserwować wpływ warunków meteorologicznych. Istnieje szereg doniesień na temat stężenia radonu w różnych typach pomieszczeń, a także jego zmianach dobowych i sezonowych (Steck, 2009; Grygier i inni, 2022). Na rys. 4 przedstawiono przykładową zmienność dobową stężenia radonu zarejestrowanego w jednej z kopalń turystycznych w Polsce.



Rys. 4. Przykładowa zmienność dobową stężenia radonu (pomiar własny)

### 2.3. Aerozole promieniotwórcze

W wyniku zachodzących przemian jądrowych, produkty rozpadu radonu/toronu mogą przyłączać się do aerozoli obecnych w powietrzu, tworząc tzw. aerozole promieniotwórcze. Mechanizm ten jest lepiej rozpoznany dla radonu. Bardzo krótko po powstaniu ( $< 1$  s), nuklidy promieniotwórcze reagują z gazami śladowymi oraz parą wodną, tworząc kompleksy zwane klastrami lub frakcją wolną (rys. 5). Średnica tak uformowanych klastrów wynosi od 0,5 do 5 nm (Porstendörfer, 1994). Wyniki pomiarów rozkładu wielkości cząstek tworzących frakcję wolną wskazują, że ich średni rozmiar jest bliski 1 nm, a geometryczne odchylenie standardowe bliskie 1, co wskazuje na jej monodispersyjny charakter (Reineking i inni, 1985; Mohamad i inni, 2008; Yamada i inni, 2024). Większość powstających klastrów jest naładowana dodatnio i charakteryzuje je duża ruchliwość. Klastry w czasie 1-100 s mogą przyłączyć się do aerozoli obecnych w atmosferze, tworząc promieniotwórcze aerozole, zwane także frakcją związaną. Nuklidy promieniotwórcze mogą podlegać desorpcji z cząstki aerozolu, z którą zostały związane. Dzieje się tak wówczas, kiedy energia odrzutu jądra powstałego w wyniku rozpadu jest wystarczająco duża, aby możliwe było jego oderwanie się od cząstki aerozolu. Udział frakcji wolnej ( $f_p$ ) zależy przede wszystkim od stężenia otaczających aerozoli. Jest to wielkość bezwymiarowa określana jako stosunek stężenia energii potencjalnej alfa odpowiadającej frakcji wolnej ( $C_{af}$ ) do całkowitego stężenia energii potencjalnej alfa ( $C_{\alpha C}$ ):

$$f_p = \frac{C_{\alpha f}}{C_{\alpha c}} \quad (2.1)$$

Pomiar stężenia energii potencjalnej alfa, odpowiadający frakcji wolnej jest skomplikowany. Niekiedy jednak można w sposób przybliżony określić udział tej frakcji w atmosferze. Według Porstendörfera udział frakcji wolnej można ocenić w oparciu o półempiryczną zależność (Porstendörfer i Reineking, 2000; Porstendörfer, 2001):

Produkty rozpadu radonu:

$$f_p = \frac{414}{Z} \quad (2.2)$$

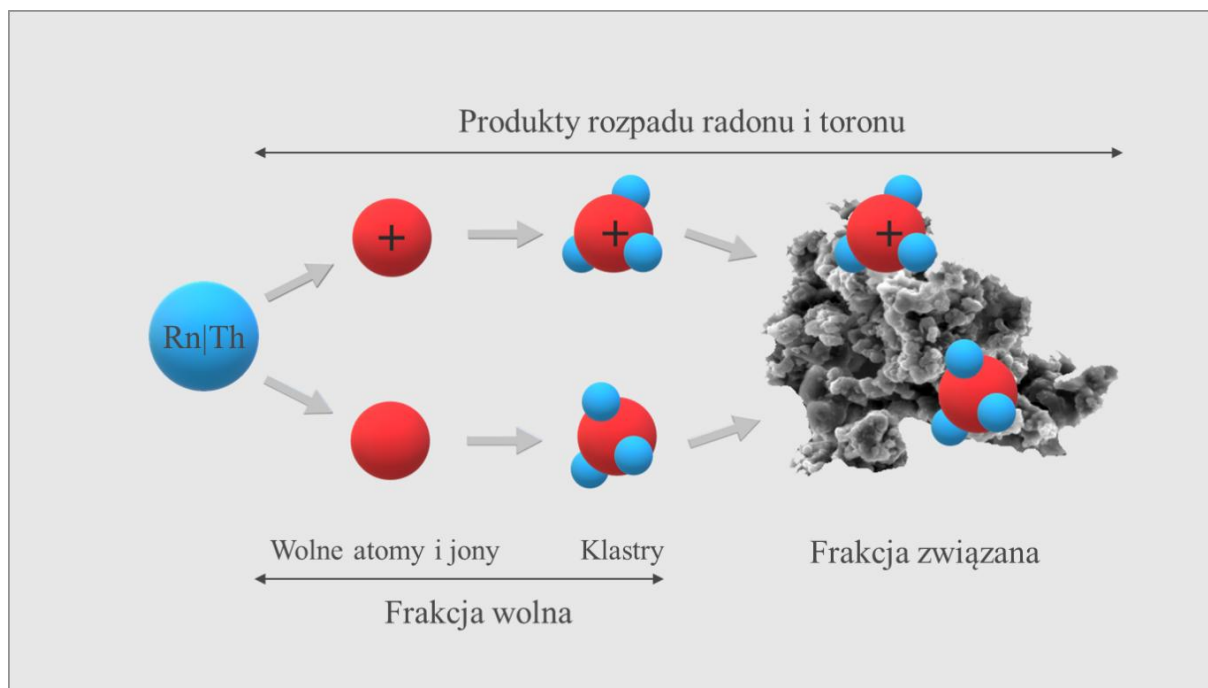
Produkty rozpadu toronu:

$$f_p = \frac{150}{Z} \quad (2.3)$$

Gdzie:

$Z$  – stężenie całkowite aerozoli środowiskowych ( $\text{cm}^{-3}$ ).

Prawdziwość powyższych zależności potwierdzają wyniki badań Tschierscha i Meisenberga, dla stężeń aerozoli w zakresie  $2000 < Z < 7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$  w przypadku równania 2.2 oraz w zakresie stężeń  $900 < Z < 3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$  dla równania 2.3 (Tschiersch i Meisenberg, 2007). Warto jednak zwrócić uwagę, że istnieją obiekty, gdzie stężenia aerozoli środowiskowych są znacznie mniejsze, co wyklucza stosowanie tych równań. Przykładem takich obiektów może być Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie, gdzie stężenie aerozoli nie przekraczało  $40 \text{ cm}^{-3}$ . Na pewno zaś stężenia aerozoli w czynnych kopalniach węgla kamiennego są wyższe, od dolnej granicy wskazanych zakresów (Skubacz i inni, 2023).



Rys. 5. Mechanizm tworzenia się frakcji wolnej i frakcji związanej produktów rozpadu radonu/toronu (opracowanie własne)

## 2.4. Wielkości stosowane w ocenie zagrożenia radonowego

Do opisu zagrożenia radonowego lub toronowego powszechnie używa się kilku wielkości, które są związane tylko z promieniowaniem alfa, wnoszącym zdecydowanie największy wkład w dawkę zdeponowaną w drogach oddechowych, w wyniku wnikięcia tych nuklidów. Ze względu na nieporównywalnie mniejszy udział promieniowania beta czy gamma w dawce skutecznej, ich wkład jest pomijany. Głównym pojęciem stosowanym do oceny zagrożenia radonowego/toronowego jest stężenie energii potencjalnej alfa (PAEC – Potential Alpha Energy Concentration). Historycznie wielkość ta była używana jako miara stężenia i była wskaźnikiem dawki i ryzyka. Potencjalna energia alfa (PAE) jest równa sumie energii kinetycznej cząstek alfa emitowanych podczas rozpadu izotopów od polonu  $^{218}\text{Po}$  aż do izotopu ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  w przypadku radonu i od polonu  $^{216}\text{Po}$  do  $^{208}\text{Pb}$  lub  $^{208}\text{Tl}$  w przypadku toronu. Zatem stężenie energii potencjalnej alfa w mieszaninie produktów rozpadu radonu lub toronu w powietrzu jest sumą energii potencjalnej produktów rozpadu radonu lub toronu, w określonej jednostce objętości. Jednostką PAEC w układzie SI jest  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ . Stężenie energii potencjalnej alfa oblicza się zgodnie z równaniem:

$$C_{\alpha} = \sum_i E_{\text{pi}} n_i \quad (2.4)$$

lub

$$C_{\alpha} = \sum_i \frac{E_{pi}}{\lambda_i} C_i \quad (2.5)$$

Gdzie:

$E_{pi}$  – energia potencjalna pojedynczego nuklidu,

$n_i$  – liczba nuklidów w przeliczeniu na jednostkę objętości gazu ( $m^{-3}$ ),

$\lambda_i$  – stała rozpadu ( $s^{-1}$ ),

$C_i$  – stężeniami promieniotwórczymi nuklidów w powietrzu ( $Bq/m^3$ ).

Po przyjęciu stałych wskazanych w tabeli 1 i 2 równania przyjmą postać:

dla produktów rozpadu radonu:

$$C_{\alpha R} = 0,588 \cdot 10^{-3} \cdot C_{R1} + 0,286 \cdot 10^{-2} \cdot C_{R2} + 0,212 \cdot 10^{-2} \cdot C_{R3} + 0,292 \cdot 10^{-9} \cdot C_{R4} \quad (2.6)$$

Gdzie:

$C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}, C_{R4}$  – stężenie promieniotwórcze w powietrzu odpowiednio dla  $^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi$  i  $^{214}Po$ .

Dla produktów rozpadu toronu postać tego równania przedstawia się następująco:

$$C_{\alpha T} = 0,489 \cdot 10^{-6} \cdot C_{T1} + 0,691 \cdot 10^{-1} \cdot C_{T2} + 0,655 \cdot 10^{-2} \cdot C_{T3} + 0,607 \cdot 10^{-12} \cdot C_{T4A} \quad (2.7)$$

Gdzie:

$C_{T1}, C_{T2}, C_{T3}, C_{T4A}$  – stężenie promieniotwórcze w powietrzu odpowiednio dla  $^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi$  i  $^{212}Po$ .

Dla oceny omawianego zagrożenia często stosuje się również wielkość zwaną stężeniem równowagowym (EEC, Equilibrium Equivalent Concentration), które w zasadzie jest pojęciem równoważnym do stężenia energii potencjalnej alfa, gdyż do jego wyliczenia stosuje się dokładnie te same wartości stałe i zmienne. Stężenie równowagowe jest równe stężeniu radonu (toronu) pozostającego w stanie wiekowej równowagi promieniotwórczej z produktami jego rozpadu, w sytuacji, kiedy odpowiadające mu stężenie energii potencjalnej alfa ma taką samą wartość, jak stężenie energii potencjalnej alfa rzeczywistej mieszaniny produktów rozpadu w gazie. W rezultacie stężenie równowagowe wylicza się ze wzoru:

$$C_{Eq} = \sum_i \frac{E_{pi}}{\lambda_i} C_i / \sum_i \frac{E_{pi}}{\lambda_i} \quad (2.8)$$

co po wstawieniu wartości stałych fizycznych prowadzi do równania na stężenie równowagowe dla radonu ( $C_{EqR}$ ) i toronu ( $C_{EqT}$ ):



$$C_{EqR} = 0,106 \cdot C_{R1} + 0,513 \cdot C_{R2} + 0,381 \cdot C_{R3} + 0,524 \cdot 10^{-7} \cdot C_{R4} \quad (2.9)$$

$$C_{EqT} = 0,646 \cdot 10^{-5} \cdot C_{T1} + 0,913 \cdot C_{T2} + 0,866 \cdot 10^{-1} \cdot C_{T3} + 0,802 \cdot 10^{-11} \cdot C_{T4A} \quad (2.10)$$

Znając stężenie energii potencjalnej alfa lub stężenie równowagowe radonu/toronu oraz ich stężenia promieniotwórcze w powietrzu możliwe jest wyznaczenie tzw. współczynnika równowagi  $F_{R/T}$ . Wielkość ta odzwierciedla stopień nierównowagi między mieszanką produktów rozpadu, a nuklidem macierzystym. Jest to pojęcie różne od terminu równowagi promieniotwórczej. Współczynnik równowagi  $F_{R/T}$  zależy nie tylko od procesów samorzutnej przemiany jądrowej danego izotopu, ale także od innych czynników wpływających na stężenie radonu i jego produktów rozpadu, takich jak na przykład intensywność przewietrzania czy straty spowodowane usuwaniem promieniotwórczych aerozoli z atmosfery w wyniku dyfuzji, bezwładności czy osadzania grawitacyjnego. Współczynnik równowagi  $F_{R/T}$  wyraża się wzorem:

$$F_R = \frac{C_{EqR}}{C_R} \quad F_T = \frac{C_{EqT}}{C_T} \quad (2.11)$$

Gdzie:

$C_R$  – stężenie promieniotwórcze radonu,

$C_T$  – stężenie promieniotwórcze toronu w powietrzu.

Współczynnik równowagi mieści się w przedziale (0, 1). Wraz ze wzrostem intensywności wentylacji zmniejsza się wartość współczynnika równowagi, a tym samym maleje zagrożenie. Przeciwnie, kiedy efektywność przewietrzania maleje. W pracach badawczych, dotyczących opisywanej problematyki zaobserwowano ujemną korelację pomiędzy współczynnikiem równowagi  $F_R$ , a udziałem frakcji wolnej  $f_p$ , w przypadku pomieszczeń oraz jaskiń turystycznych (Tokanami i inni, 1996; Vargas i inni, 2000; Marsh i inni, 2002; Vaupotic, 2007). W przypadkach, kiedy intensywność wentylacji jest niska, a stężenie aerozoli wysokie, to udział frakcji wolnej jest niski. Wówczas produkty rozpadu radonu występują jako frakcja związana i pozostają w powietrzu, zatem współczynnik równowagi jest wysoki. W obiektach z wentylacją mechaniczną (np. kopalnie) występowanie korelacji między wielkościami  $F_R$  a  $f_p$  jest mało prawdopodobne. Zatem kontrola narażenia powinna być oparta na pomiarach stężenia PAEC, a nie badaniu stężenia promieniotwórczego radonu.

Miarą narażenia na promieniowanie jest dawka skuteczna związana z radonem bądź toronem i produktami ich rozpadu. Zależy ona od stężenia energii potencjalnej alfa i czasu ekspozycji. Wartość obciążającej dawki skutecznej wyznacza się jako iloczyn tych wielkości i współczynnika konwersji stężenia energii na dawkę. Współczynnik konwersji dla frakcji wolnej jest

znacznie większy niż współczynnik konwersji dla większych cząstek o rozmiarach do kilku mikrometrów. Wynika to ze sposobu depozycji niewielkich cząstek w układzie oddechowym. Z tego względu, w warunkach zwiększonego zagrożenia, celem jest dla poprawy jakości oceny określenie udziału frakcji wolnej.

## **2.5. Zagrożenie radonowe a zdrowie**

Narażenie na radon/toron, a zwłaszcza ich produkty rozpadu, jest dużym zagrożeniem dla zdrowia (NRC, 1998). Z uwagi na fakt, iż jest to czynnik naturalny, zagrożenie to często było bagatelizowane. Dane pochodzące z USA i Kanady wskazują, że radon jest drugą po paleniu papierosów przyczyną raka płuc i główną przyczyną raka płuc u osób, które nie są palaczami (EPA, 2024). Radon jest w USA zidentyfikowanym zawodowym czynnikiem onkogenym. Według badań europejskich ryzyko raka płuc wzrasta o 16% na każde 100 Bq/m<sup>3</sup> wzrostu stężenia radonu w domu i nie zależy od wieku, płci, ani historii palenia tytoniu. Podobne wyniki uzyskano w badaniach prowadzonych w Chinach i USA (Darby, 2005; Krewski i inni, 2005; Lubin i inni, 2004; WHO, 2009). Badania przeprowadzone na górnikach jasno wykazały związek między zachorowaniem na raka płuc, a ekspozycją na radon. W badaniach na szczurach, chomikach i psach wykazano wzrost częstości występowania nowotworu dróg oddechowych ze wzrostem stężenia radonu. Natomiast w badaniach na komórkach ludzkich odnotowano powstawanie nieprawidłowości chromosomalnych oraz innych trwałych uszkodzeń komórkowych pod wpływem radonu i jego pochodnych (Frumkin i inni, 2001; IARC, 1988).

Według Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IAEC) radon jest czynnikiem rakotwórczym grupy I (tak samo jak dym tytoniowy, azbest czy benzyna). W celu ograniczenia narażenia, wiele krajów przyjęło wytyczne World Health Organization (WHO) oraz poziomy referencyjne. Poziomem referencyjnym nazywa się średnie roczne stężenie radonu w budynkach mieszkalnych, powyżej którego zaleca się redukcję jego stężenia. Większość krajów członkowskich WHO przyjęło za poziom referencyjny wartość stężenia promieniotwórczego radonu między 100 a 400 Bq/m<sup>3</sup>. Należy jednak pamiętać, że poziom referencyjny nie definiuje „bezpiecznego” stężenia radonu, a raczej poziom ryzyka, nieakceptowalny w przypadku długotrwałego narażenia, którego przekroczenie wymaga podjęcia działań, w celu zmniejszenia stężenia promieniotwórczego radonu.

Jak przedstawiono we wcześniejszej części, w wyniku rozpadu radonu/toronu powstają ich produkty rozpadu, które przyłączają się do aerozoli środowiskowych, tworząc aerozole promieniotwórcze. Osadzanie się pochodnych tych nuklidów w drogach oddechowych zależy między innymi od objętości płuc, prędkości i sposobu oddychania (nos czy usta), oraz od wielkości cząstek zawierających te nuklidy. Promieniowanie alfa emitowane przez pochodne deponuje swoją energię w drogach oddechowych, głównie na wrażliwym nabłonku płuc. Promieniowanie jonizujące może powodować pęknięcia nici DNA, mutacje genów, zmiany chromosomalne, apoptozę czy niestabilności genetyczne. W wyniku oddziaływania promieniowania jonizującego z komórką możliwe jest również powstawanie reaktywnych pośrednich związków tlenu, które mogą powodować uszkodzenia oksydacyjne DNA. Uszkodzone komórki mogą stać się komórkami nowotworowymi. Ponieważ uszkodzenie genetyczne komórki może spowodować nawet pojedyncza cząstka alfa, określenie dawki progowej dla nowotworu indukowanego radonem jest mało prawdopodobne (Field, 2019).

Nie jest jasne, czy ryzyko zachorowania jest takie samo dla górników narażonych na radon w kopalniach i osób z ogółu ludności narażonych na radon w budynkach mieszkalnych. Występują pewne różnice środowiskowe mogące przyczynić się do wzrostu ryzyka zachorowania górników. W kopalniach oprócz wyższego niż w domach stężenia radonu, większe jest również stężenie pyłu w powietrzu, co nie jest bez znaczenia w procesie tworzenia się aerozoli promieniotwórczych. Ponadto wpływ na ryzyko zaistnienia choroby może mieć także obecność innych substancji toksycznych w powietrzu kopalni, zdecydowanie większy poziom aktywności fizycznej górników i związana z nią częstość oddychania, różny czas trwania ekspozycji oraz inne współczynniki równowagi  $F_{R/T}$  w kopalniach i w domach. Znaczenie ma też sposób oddychania u górników podczas wysiłku - przez usta, a nie przez nos, co prowadzi do osadzania się większych cząstek w płucach. Inne istotne czynniki to płeć i wiek.

## **2.6. Występowanie zagrożeń radonowych i toronowych**

Stężenie promieniotwórcze radonu/toronu związane jest z budową geologiczną warstw przy powierzchni ziemi, a w przypadku kopalń podziemnych z rodzajem i właściwościami fizycznymi skał w rejonie prowadzonej eksploatacji. Około 70% powierzchni Polski tworzą polodowcowe skały czwartorzędowe, cechujące się niskim i średnim potencjałem radonowym. Wyższym potencjałem radonowym cechują się takie skały jak: granity karkonoskie i strzegomskie, gnejsy Gór Izerskich, skał metamorficzne i magmowe Gór Kaczewskich i Kotliny Kłodzkiej. Na wyższe stężenia radonu narażony jest również obszar Suwalszczyzny, który budują

skały zlodowacenia bałtyckiego. Takie obszary jak Góry Świętokrzyskie, których podłożem są skały iłowcowe dewonu i syluru również mogą cechować się podwyższonym stężeniem radonu w glebie. Nieco wyższe stężenia radonu obserwuje się także w pokrywach lessowych Wyżyny Lubelskiej (Gov, 2025). Średnie stężenie radonu w powietrzu atmosferycznym w Polsce szacuje się na 10 Bq/m<sup>3</sup>. Przykładowo, stężenie radonu w Warszawie w powietrzu wynosi niepełna 3 Bq/m<sup>3</sup>, natomiast w Kowarach zmierzono 30 Bq/m<sup>3</sup>. Wyższe stężenia niż w powietrzu atmosferycznym obserwuje się w pomieszczeniach zamkniętych. Średnie stężenie promieniotwórcze radonu w budynkach mieszkalnych w Polsce wynosi 32 Bq/m<sup>3</sup>. W Europie średnia wartość waha się od 20 do 100 Bq/m<sup>3</sup>, ale w niektórych krajach (Czechy) mogą sięgać nawet 200 Bq/m<sup>3</sup>. Z kolei w kopalniach węgla na terenie GZW jego stężenie sięgało 15000 Bq/m<sup>3</sup>, a w kopalniach dolnośląskich nawet 150000 Bq/m<sup>3</sup> (Skowronek, 2007).

Narażenie ogółu ludności na radon/toron jest powiązane głównie z ekshalacją tych nuklidów z podłoża pod budynkiem i przenikaniem do kondygnacji mieszkalnych poprzez pęknięcia w fundamentach. W rezultacie stężenia są większe na niższych kondygnacjach, a jeśli budynek jest podpiwniczony to w piwnicach. W takich przypadkach kluczowy jest teren, na którym posadowiony jest budynek. W niektórych krajach, takich na przykład jak Czechy określa się potencjał radonowy podłoża i w zależności od stopnia potencjalnego zagrożenia zaleca się zastosowanie odpowiedniej technologii przy budowie domów. Oprócz rodzaju podłoża poziom zagrożenia zależy w dużej mierze od trybu życia mieszkańców. Częste wietrzenie pomieszczeń obniża stężenie promieniotwórcze radonu/toronu i tym samym produktów jego rozpadu. W zimie zaś, z oczywistych względów wietrzenie pomieszczeń nie jest tak częste i w rezultacie zagrożenie może wzrastać. Niekiedy też poziom stężenia radonu rośnie w wyniku zastosowania materiałów budowlanych o zwiększonym stężeniu radu. Taka sytuacja może dotyczyć starszych budynków. Od dłuższego już bowiem czasu na materiały budowlane stosowane w Polsce narzucone są normy ograniczające dopuszczalne stężenia radu i toru.

W przypadku obiektów innych niż budynki mieszkalne, problem związany z tego rodzaju zagrożeniem można powiązać z podwyższonym stężeniem nuklidów z szeregu uranowego i torowego, które poprzedzają radon i toron. Na świecie, w tym w Polsce, funkcjonują obiekty przeznaczone do przechowywania zużytych źródeł promieniowania. Niektóre z nich zawierają rad, co prowadzi do zwiększenia poziomu zagrożenia. Podobna sytuacja może mieć również miejsce w obiektach turystycznych (kopalniach), w których kiedyś wydobywano rudę uranu w postaci blendy smolistej, która jest podstawowym minerałem zawierającym uran. Przeciętne

stężenie  $^{226}\text{Ra}$  w tym mineralu wynosi 5000 kBq/kg i znacznie przewyższa przeciętne wartości w glebie tj. 0,025 kBq/kg. W kopalniach turystycznych w Kletnie i w Kowarach stężenia radonu mogą osiągać wysokie wartości przewyższające znacznie wartość 300 Bq/m<sup>3</sup>, przyjętą jako poziom referencyjny w Polsce. I tak w zależności od sezonu stężenie radonu w kopalni w Kletnie może się zmieniać w zakresie 2 do 10 kBq/m<sup>3</sup> (Fijałkowska-Lichwa, 2015), a w kopalni "Podgórze" w Kowarach sięgać może nawet 1000 kBq/m<sup>3</sup> (Fijałkowska-Lichwa, 2016). Podwyższone stężenie radu w materiałach może również nastąpić w wyniku procesów technologicznych. Przykładem takiej sytuacji są stacje uzdatniania wody, jak na przykład w Arabii Saudyjskiej, gdzie w wyniku filtrowania wody powstają odpady stałe zawierające rad  $^{226}\text{Ra}$  o stężeniu od 4490 do 6750 Bq/kg (Al-Jaseem i inni, 2016). Osady o podwyższonej promieniotwórczości powstają również w przemyśle naftowym. W Turcji odnotowano, że przeciętna aktywność radu w powstających osadach sięgała 32 kBq/kg (Parmaksiz i inni, 2015). Nie zawsze jednak wyłącznie zwiększona aktywność radu jest przyczyną podwyższonych stężeń radonu w powietrzu. Przykładem takiej sytuacji mogą być podziemne kopalnie węgla kamiennego w Polsce, gdzie podwyższone stężenie produktów rozpadu radonu występuje w pobliżu miejsc eksploatacji. W kopalniach tych w wyniku procesu urabiania następuje rozkruszenie materiału skalnego, co sprzyja zwiększeniu ekshalacji radonu. Prowadzi to w rezultacie do znaczącego zwiększenia stopnia zagrożenia, nawet jeśli stężenie radu w pozyskanym urobku jest na poziomie przeciętnego stężenia w glebie. Dodatkowym czynnikiem wzmagającym zagrożenie jest niższa efektywność wentylacji podziemnych wyrobisk górniczych w porównaniu do obiektów na powierzchni (Wysocka i inni, 2021; Bonczyk i inni, 2022).

Zagrożenie związane z występowaniem radonu jest zwykle większe w porównaniu do produktów rozpadu toronu. Są jednak miejsca, gdzie sytuacja jest zupełnie odwrotna. W Chinach w prowincjach Shanxi, Shaanxi, Gansu i Henan, na wyżynie lessowej, budowane są domy z materiałów zawierających podwyższone aktywności izotopów z szeregu torowego, a zmierzone stężenia toronu sięgały wewnątrz nich do wartości 1085 Bq/m<sup>3</sup>, podczas gdy radon występował tam jedynie w stężeniach do 295 Bq/m<sup>3</sup> (Shang i inni, 2005). Oznacza to, że również toron może być źródłem znacznych dawek. Wskazują na to badania wykonane w Japonii, Wietnamie i Chinach opisane w wielu publikacjach (Virk i Sharma, 2002; WHO, 2009; UNSCEAR, 2013; Zunic i inni, 2017). Również i w Europie występują miejsca, gdzie zagrożenie toronowe jest wysokie, szczegółowo opisują to Smetsers i inni (Smetsers i inni, 2018).

### **3. Zagrożenie radonowe w prawodawstwie europejskim i krajowym**

W rozdziale dokonano przeglądu europejskich i krajowych regulacji prawnych, które dotyczą zagrożeń radonowych i toronowych, w tym sposobu oceny, ograniczania i obowiązków kierowników jednostek organizacyjnych, w których takie zagrożenia występują. Przedstawiono tu również zalecenia sformułowane w publikacjach ICRP.

W ślad za wynikami badań naukowych, wskazujących na duże zagrożenia dla zdrowia stwarzane przez radon i toron, pojawiły się dyrektywy europejskie regulujące te problemy od strony prawnej. W dniu 5 grudnia 2013 r. uchwalono Dyrektywę Rady 2013/59/Euratom ustanawiającą normy bezpieczeństwa zmierzające do ochrony przed promieniowaniem jonizującym (Dyrektywa, 2013). Nowa dyrektywa uchyliła obowiązujące do czasu jej ustanowienia przepisy, wskazując jednocześnie datę 6 lutego 2018 r. jako termin ostateczny wdrożenia przez państwa członkowskie Unii Europejskiej aktów parlamentarnych, przepisów wykonawczych i administracyjnych niezbędnych do jej przestrzegania. Wbrew dotychczasowym regulacjom prawnym, szereg postanowień nowej dyrektywy dotyczy tzw. „zagrożenia radonowego”, związanego z występowaniem w powietrzu izotopów radonu. Chociaż dla uproszczenia wskazuje się w niej na „zagrożenie radonowe”, to dyrektywa wyraźnie stwierdza, że chodzi jednocześnie o narażenie na produkty rozpadu radonu.

Aby zapewnić bezpieczeństwo i optymalizację ochrony radiologicznej, dokument ten zobowiązuje państwa członkowskie do ustalenia krajowych poziomów referencyjnych dla stężeń radonu w pomieszczeniach. W przypadku budynków mieszkalnych poziom ten, dla średniego rocznego stężenia radonu w powietrzu nie mogą być wyższe niż 300 Bq/m<sup>3</sup>. Podobna wartość zalecana jest w dyrektywie dla stężeń radonu w miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń. W tym jednak przypadku dopuszczalne jest zwiększenie krajowego poziomu referencyjnego, jeśli jest to uzasadnione istniejącymi warunkami występującymi w danym kraju, a odpowiedni dokument zostanie przekazany Komisji Europejskiej. Przyjmując poziom referencyjny, ważne jest, aby mieć świadomość, że statystycznie istotny wzrost ryzyka raka płuc występuje już w wyniku długotrwałego narażenia na radon w pomieszczeniach, w których stężenie wynosi 100 Bq/m<sup>3</sup>. Dyrektywa wskazuje również, że ryzyko to znacznie wzrasta, jeśli zagrożenie radonem jest jednocześnie powiązane z paleniem tytoniu.

W związku z pojawieniem się dyrektywy dokonano pewnych zmian w ustawodawstwie krajowym. Największe znaczenie dla zagadnień związanych z zagrożeniem radonowym mają następujące dokumenty:

- Ustawa Prawo atomowe 2000 wraz z późniejszymi zmianami (Prawo atomowe, 2000),
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz.U. 2021 poz. 1657),
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz.U. 2020 poz. 1139).

Ustawa Prawo atomowe (2000) reguluje kwestię narażenia na radon. W dokumencie tym został ustalony poziom odniesienia w wysokości  $300 \text{ Bq/m}^3$  dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu w miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń oraz w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi. Zgodnie z art. 4.1a wykonywanie działalności związanej z narażeniem polegającej na wykonywaniu pracy w miejscach pracy, w których, pomimo podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji, stężenie radonu wewnątrz pomieszczeń w tych miejscach przekracza poziom referencyjny, lub na wykonywaniu jej w miejscach pracy pod ziemią, w których, mimo podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji, poziom stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w tych miejscach pracy wskazuje na możliwość otrzymania przez pracownika dawki skutecznej (efektywnej) większej niż 1 mSv rocznie wymaga powiadomienia w zakresie ochrony radiologicznej. Ustawodawca zastrzega jednak w art. 6a., że Rada Ministrów określi, w drodze rozporządzenia przypadki, w których wykonywanie działalności związanej z narażeniem, o której mowa w art. 4 ust. 1a, nie wymaga uzyskania zezwolenia, dokonania zgłoszenia albo dokonania powiadomienia. Takie kryteria zostały określone w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 10 marca 2021 r.

Zgodnie z art. 23c ust.1 Prawa atomowego kierownicy jednostek wykonujących działalność, w której występują miejsca pracy:

- 1) zlokalizowane wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia,

2) pod ziemią,

3) związane z uzdatnianiem wód podziemnych na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia

– zapewniają w tych miejscach pracy pomiar stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu.

W ust. 2 ustawodawca zobowiązuje kierowników jednostek wykonujących działalność, w których występują miejsca pracy, o których mowa powyżej, do zapewnienia optymalizacji narażenia pracowników wykonujących pracę w tych miejscach pracy oraz informowania na bieżąco na piśmie takich pracowników o zwiększonym narażeniu na radon, wynikach pomiarów stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w miejscu pracy, otrzymanych przez nich dawkach promieniowania oraz działaniach podejmowanych w celu ograniczenia narażenia na radon w miejscu pracy. W ust. 3 natomiast w przypadku, gdy w miejscach pracy, o których mowa w ust. 1 pkt 1, wynik pomiaru, o którym mowa w ust. 1, wskazuje na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia, kierownicy jednostek podejmują działania zapewniające ograniczenie narażenia pracowników na radon. Kolejne zobowiązania kierowników jednostek sformułowano w ust. 4, w przypadku, gdy w miejscach pracy, o których mowa w ust. 1 pkt 2 lub 3, narażenie pracowników na otrzymanie dawki skutecznej (efektywnej) jest większe niż 1 mSv rocznie, kierownicy jednostek podejmują działania zapewniające ograniczenie narażenia pracowników na radon. W omawianych przepisach ustawodawca, w ust. 5 i 6 wyróżnia kategorie, do których zalicza się pracowników w zależności od poziomu otrzymanej dawki skutecznej. W myśl tych przepisów pracowników wykonujących pracę w miejscach pracy, o których mowa w ust. 1, którzy mogą być narażeni na otrzymanie dawki skutecznej (efektywnej) większej niż 6 mSv rocznie, kwalifikuje się do kategorii A. Pracowników wykonujących pracę w miejscach pracy, o których mowa w ust. 1 pkt 1, w których – mimo podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji – stężenie promieniotwórcze radonu przekracza poziom odniesienia, ale którzy nie są narażeni na otrzymanie dawki skutecznej (efektywnej) większej niż 6 mSv, oraz pracowników wykonujących pracę w miejscach pracy, o których mowa w ust. 1 pkt 2 i 3, którzy mogą być narażeni na otrzymanie dawki skutecznej (efektywnej) większej niż 1 mSv rocznie, ale nie większej niż 6 mSv rocznie, kwalifikuje się do kategorii B.



Załącznik do Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. mówi, że jeżeli źródłem narażenia wewnętrznego jest obecny w powietrzu radon i jego pochodne to obciążającą dawkę skuteczną (efektywną) wyznacza się przez pomiar lub obliczenie energii potencjalnej alfa jako całkowitej energii cząstek alfa wyemitowanych podczas rozpadu pochodnych radonu  $^{222}\text{Rn}$  w szeregu promieniotwórczym, aż do ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  (z wyłączeniem tego izotopu) oraz rozpadu pochodnych toronu  $^{220}\text{Rn}$  w szeregu promieniotwórczym, aż do ołowiu  $^{208}\text{Pb}$ . Energię potencjalną alfa wyraża się w dżulach (J), a obciążającą dawkę skuteczną w siwertach (Sv). Dawka skuteczna jest iloczynem stężenia energii potencjalnej alfa, czasu narażenia (h), oraz odpowiedniego współczynnika konwersji dawki (Rozporządzenie, 2021).

Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. określa tereny, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom referencyjny. Lista zawiera wykaz 27 powiatów. Najwięcej wyznaczonych powiatów znajduje się w województwie dolnośląskim. Dla województwa śląskiego jest to wyłącznie powiat Cieszyński (Rozporządzenie 2020).

Oprócz przywołanych wyżej dokumentów zagadnienie związane z wykonywaniem pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i oceną dawek, reguluje również Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Rozporządzenie, 2016). Przepisy tego rozporządzenia wdrożone są w podziemnych zakładach górniczych. Sposób i częstotliwość prowadzenia kontroli środowiskowych określono w tabeli nr 1, stanowiącej załącznik nr 3 do powyższego rozporządzenia. Dane zawarte w tabeli mówią o tym, że stężenie energii potencjalnej alfa w powietrzu należy mierzyć raz na kwartał, jeżeli stężenie PAEC jest mniejsze bądź równe  $0,5 \mu\text{J}/\text{m}^3$  i raz w miesiącu, jeśli jest większe niż  $0,5 \mu\text{J}/\text{m}^3$ . Zwiększenie częstotliwości pomiarów jest wymagane już po jednokrotnym otrzymaniu wyniku powyżej górnej granicy przedziału. Częstotliwość pomiarów można zmniejszyć, jeżeli wyniki trzech kolejnych pomiarów są mniejsze od dolnej granicy przedziału. Częstotliwość pomiarów nie może być jednak niższa niż raz na kwartał.

Dysponując pomiarami stężenia energii potencjalnej alfa można wyliczyć dawkę skuteczną, otrzymaną w wyniku narażenia na radon i jego pochodne, dla przewidywanego rocznego czasu pracy (t). Dawkę związaną z produktami rozpadu radonu oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$D_R = 10^{-3} \cdot k_R \cdot (C_{\alpha R} - 0.1) \cdot t_E \quad (3.1)$$

Gdzie:

$D_R$  – dawka skuteczna (mSv),

$C_{\alpha R}$  – stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu ( $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ),

$t_E$  – czas ekspozycji (godziny),

$k_R$  – współczynnik konwersji dla produktów rozpadu radonu ( $\text{mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ ).

Tak wyliczona wartość jest dawką ponad tło naturalne, które zgodnie z tą regulacją prawną wynosi  $0,1 \mu\text{J}/\text{m}^3$ . W sytuacji, kiedy  $C_{\alpha R} < 0,1 \mu\text{J}/\text{m}^3$  należy przyjąć, że dawka skuteczna jest równa zero. Przyjmuje się, że współczynnik konwersji dawki w tej zależności wynosi  $k_R = 1,4 \text{ mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ , co jest zgodne z wartością wskazywaną przez Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące. Wartości współczynników konwersji powinny zostać przyjęte zgodnie z aktualnymi regulacjami prawnymi. W najnowszej publikacji ICRP oraz zaleceniach UE (ICRP, 2017; UE, 2024) ich rekomendowane wartości są jednak znacznie wyższe, niż te wskazywane aktualnie przez polskie regulacje prawne, co zostało przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Obowiązujące i rekomendowane współczynniki konwersji na dawkę

Współczynniki konwersji w polskich regulacjach prawnych $\text{mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$		Współczynniki konwersji rekomendowane przez ICRP $\text{mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$	
Radon w domu mieszkalnym	1,1	-	-
Radon na stanowisku pracy	1,4	Radon miejsca pracy w pomieszczeniu	5,6
		Radon w kopalniach	3,1
		Radon w jaskiniach turystycznych	6,6
Toron na stanowisku pracy	0,5	Toron miejsca pracy w pomieszczeniu	1,6
		Toron w kopalniach	1,4

Ponadto, kiedy istnieją uzasadnione przypuszczenia, że rzeczywiste współczynniki konwersji mogą znacząco się różnić od tych rekomendowanych, ICRP wskazuje na możliwość zastosowania odpowiedniej korekty. Wartości rekomendowane zostały bowiem określone przez przyjęcie a priori prawdopodobnych wartości udziału frakcji wolnej. Odpowiednia korekta może zatem zostać wykonana przez ocenę tej wartości w miejscu występowania zagrożenia radonowego lub po wyznaczenie rozkładu ziarnowego aerozoli promieniotwórczych. Publikacja ICRP określa również współczynniki konwersji pozwalające na wyliczenie dawek w oparciu o stężenie promieniotwórcze radonu. W tym przypadku zakłada się jednak określoną wartość współczynnika równowagi, co rzecz jasna nie musi być zgodne z rzeczywistością. Dla toronu również

określono w publikacji współczynniki konwersji o takim samym wymiarze ( $\text{mSv}/(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})$ ) z tym zastrzeżeniem, że chodzi o stężenie równowagowe toronu, co sprowadza się do konieczności określenia stężenia energii potencjalnej alfa produktów jego rozpadu, a nie stężenia samego toronu. O ile bowiem w warunkach rzeczywistych można dokonać pewnych założeń w odniesieniu do wartości współczynnika równowagi dla radonu i produktów jego rozpadu, to jest to zupełnie nierealne dla toronu.

## **4. Metody pomiaru stężeń promieniotwórczych radonu i toronu oraz produktów ich rozpadu**

Rozdział ten obejmuje opis metod, które są powszechnie wykorzystywane do pomiaru stężeń radonu/toronu i stężenia produktów ich rozpadu. Biorąc pod uwagę omówione wcześniej miejsca występowania zagrożeń radonowych i toronowych, regulacje prawne co do ich monitoringu oraz cel pracy należy wspomnieć o istotnych ograniczeniach w aplikacji dostępnych metod pomiarowych. Ograniczenie to wynika ze specyfiki środowiska podziemnego oraz obostrzeń, co do stosowania urządzeń pomiarowych w kopalniach wynikających z innych przepisów. W wielu przypadkach zastosowany sprzęt pomiarowy musi być iskrobezpieczny ze względu na zagrożenie metanowe. Proces certyfikacji takich urządzeń jest kosztowny i czasochłonny. Ponadto warunki środowiskowe są wyjątkowo trudne ze względu na wysoką wilgotność, wysokie stężenie pyłu, ograniczoną przestrzeń i możliwość uszkodzeń stosowanych urządzeń. W przypadku urządzeń o większych wymiarach i wadze występują dodatkowe problemy z ich transportem na miejsce pomiaru. Z perspektywy rutynowych zastosowań pożądane metody pomiarowe i urządzenia w nich stosowane muszą być łatwe w obsłudze i nie powinny wymagać specjalnego przeszkolenia (kompetencji) użytkownika, często pracownika personelu kopalni.

### **4.1. Pomiary stężenia promieniotwórczego radonu i toronu**

Techniki pomiaru radonu można podzielić na dwie główne grupy: aktywne i pasywne. Zastosowanie metod aktywnych daje możliwość pomiaru w określonym czasie, odczytu wyników pomiaru na bieżąco lub bezpośrednio po pomiarze i rejestracji danych. Niewątpliwą wadą metod aktywnych jest konieczność zasilania, nawet jeśli miernik ma wbudowaną baterię, jego czas pracy jest nadal mocno ograniczony. Metody aktywne obejmują komory jonizacyjne, komory scyntylacyjne i spektrometry promieniowania alfa. Metody pasywne nie wymagają zasilania. Jednak ich wadą jest konieczność stosowania dodatkowego sprzętu (mikroskopów, urządzenia do wytrawiania) w celu uzyskania wyniku pomiaru. Metody pasywne są metodami całkowitymi i obejmują detektory śladowe oraz komory jonowe elektretowe. Na rynku dostępnych jest wiele urządzeń do pomiaru stężeń radonu. Jednak ze względu na problematyczne warunki i szczególne wymagania techniczne nie wszystkie dostępne urządzenia mogą być stosowane w kopalniach. Zwykle do pomiarów w kopalniach stosuje się detektory śladowe wyposażone w folie CR-39 lub komórki Lucasa. W wyniku działania promieniowania w folii powstają „ślady”, które po powiększeniu w procesie trawienia mogą zostać policzone za pomocą mikroskopu.

Zalecany czas ekspozycji mieści się w granicach 1-3 miesięcy. W przypadku komórek Lucasa, ścianki wewnętrzne są pokryte scyntylatorem, najczęściej siarczkiem cynku z domieszką talu. W wyniku oddziaływania promieniowania emitowanego przez wpompowany do komórki radon z siarczkiem cynku, powstają błyski światła rejestrowane przez fotopowielacz. Jest to zatem technika z grup aktywnych umożliwiająca pomiar chwilowy stężenia radonu. Dłuższy pomiar (2-4 doby) możliwy jest z zastosowaniem detektorów wykorzystujących węgiel aktywny sorbujących radon. Po ekspozycji do naczynka z węglem aktywnym wlewa się ciekły scyntylator, a radon ulega desorpcji z węgla i absorpcji w scyntylatorze. Błyski światła emitowane pod wpływem promieniowania jonizującego są rejestrowane przez odpowiednie spektrometry ciekłoscyntylacyjne.

## **4.2. Pomiar stężeń produktów rozpadu radonu i toronu oraz energii potencjalnej alfa**

Pomiar stężenia produktów rozpadu radonu lub toronu jest znacznie bardziej skomplikowany w porównaniu do pomiaru gazowego radonu/toronu. Zwykle wymaga zastosowania jakiegoś układu filtracyjnego, zbierającego aerozole i układu detekcji do rejestracji promieniowania emitowanego przez przechwycone produkty rozpadu. Najogólniej rzecz ujmując, metody wykorzystywane do tego celu można podzielić ze względu na rodzaj stosowanych przyrządów na metody aktywne, kiedy do detekcji stosuje się na przykład spektrometry lub metody pasywne, kiedy detekcja jest prowadzona za pomocą na przykład detektorów śladowych. Dostępne metody można też podzielić ze względu na czas pomiaru na długotrwałe, do takich metod zalicza się metodę detektorów śladowych i termoluminescencyjnych, oraz na chwilowe, czyli te wykorzystujące spektrometry i liczniki scyntylacyjne. Ocena stężeń produktów rozpadu w powietrzu wymaga wykonania pomiarów aktywności nuklidów promieniotwórczych zgromadzonych na filtrze w różnych interwałach czasowych. Ich liczbę można ograniczyć w przypadku stosowania układów spektrometrycznych promieniowania alfa lub gamma, pozwalających na identyfikację poszczególnych nuklidów. Liczniki scyntylacyjne mają gorszą zdolność rozdzielczą i w takim przypadku brak jest możliwości prowadzenia takiej identyfikacji (Zhang i Luo, 1983; Islam i Haque, 1994; Stajic i Nikezic, 2015; Wang i inni, 2021; Wang i inni, 2022).

Oprócz pomiarów stężenia promieniotwórczego radonu/toronu czy stężenia produktów ich rozpadów, możliwy jest pomiar energii potencjalnej alfa produktów rozpadu przechwyconych przez filtr, co pozwala ocenić stężenie energii potencjalnej alfa w powietrzu. Stosując tę metodę nie sposób zmierzyć stężenie poszczególnych produktów rozpadu radonu. Mimo tego pomiar

stężenia energii potencjalnej alfa jest wystarczający do oceny dawki skutecznej. Taki pomiar można wykonać za pomocą detektorów termoluminescencyjnych, usytuowanych nad filtrem ze zdeponowanymi produktami rozpadu radonu lub toronu. Do tego celu stosuje się również klisze fotograficzne czy detektory śladowe (Lebecka i inni, 1988; Yu i inni, 2005; Imito i inni, 2005; Nikezić i Yu, 2010).

Stosując aktywne metody pomiaru produktów rozpadu radonu/toronu konieczne jest dobranie odpowiedniego czasu poboru próbki, jak również zastosowanie odpowiednich interwałów czasowych, w których wykonywane są pomiary aktywności filtra. Interwały powinny być dobrane tak, aby w jak najbardziej efektywny sposób dokonać oznaczenia  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  w przypadku produktów rozpadu radonu lub  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  dla produktów rozpadu toronu uwzględniając ich czasy połowicznego rozpadu. Informacja o stężeniach tych nuklidów jest bowiem kluczowa do właściwej oceny stężenia energii potencjalnej alfa. Stosowane interwały czasowe przez lata były modyfikowane przez wielu badaczy zajmujących się tym zagadnieniem. Wyznaczaniem stężeń pochodnych radonu w powietrzu zajmował się Tsivoglou, który badał współczynnik równowagi pomiędzy radonem, a jego pochodnymi w kopalniach uranu. Metoda opracowana przez Tsivoglou polegała na przepompowywaniu powietrza przez filtr w czasie 5 minut i ocenie jego aktywności przez 5, 15 i 30 minut po zakończeniu pobierania próbki (Tsivoglou i inni, 1953). Na podstawie tych danych rozwiązywano układ równań, wyznaczając liczbę atomów każdego z trzech nuklidów na filtrze ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ ). Później Tsivoglou (1953) zmodyfikował metodę uwzględniając fakt, że na filtrze przebiegają jednocześnie procesy narastania i rozpadu nuklidów.

W kolejnych latach J.W. Thomas (1970) zmodyfikował metodę Tsivoglou stwierdzając, że większą precyzję uzyskuje się dokonując pomiaru aktywności nuklidów promieniotwórczych zebranych na filtrze w przedziałach 2-5 min, 6-20 min i 21-30 min po zakończeniu pobierania próbki. Ustalił on, że najlepszy rezultat zostanie osiągnięty, jeśli pomiar aktywności filtra nastąpi do 1 minuty po zakończeniu poboru próbki, jednakże z przyczyn praktycznych przyjęto, że pierwszy pomiar rozpocznie się po 2 minutach. Według Thomasa, zastosowanie tej modyfikacji obniżało od 2 do 3 razy niepewność pomiaru, w porównaniu do metody Tsivoglou. Później jeszcze kilkakrotnie zmieniano interwały czasowe. I tak Cliff (1978) zaproponował, aby pierwszy pomiar aktywności przeprowadzić już w czasie poboru próbki w przeciągu 15 minut, a kolejne pomiary między 16 a 36 minutą i 37 a 57 minutą, co poprawi granicę wykrywalność metody o rząd wielkości w stosunku do metody Thomasa. Z kolei Busigin i Philips (1980) stwierdzili, że pomiary wykonane w czasie 2-5 min, 7-15 min i 25-30 min po zakończeniu

pobierania próbki dadzą poprawę precyzji o 37% w przypadku polonu  $^{218}\text{Po}$ . Najdłuższy czas trwania cyklu pomiarowego zaproponował Nazaroff (1984): 5 minut pobierania próbki i pomiar aktywności w czasie 6-9 minut, 12-29 minut, 40-60 minut lub 7-10 minut, 13-30 minut i 42-60 minut. Opisane powyżej metody przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Interwały czasowe pobierania próbki zaproponowane przez różnych badaczy

Metoda	Pobór próbki	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
	(minuty)	(minuty)	(minuty)	(minuty)
Thomas (1970)	0-5	7-10	11-25	26-35
Cliff (1978)	0-15	0-15	16-36	37-57
Busigin i Philips (1980)	0-5	7-12	14-22	32-37
Nazaroff (1984)	0-5	6-9	12-29	40-60
	0-5	7-10	13-30	42-60

Kolejne prace dotyczyły metody oznaczenia jednocześnie stężenia produktów rozpadu radonu i toronu (Khan i Philips, 1986; Pogorski i Philips, 1986; Zhang i Luo, 1983). Szczegóły tych metod opisano w tabeli 5. Ponieważ w takich przypadkach należy określić aktywności większej liczby różnych nuklidów, układ równań zawiera więcej składników i w konsekwencji liczba danych musi być również większa. Stąd konieczność wykonania pomiarów w czterech lub pięciu interwałach czasowych. Schemat pomiarowy przedstawiony przez Zhang i Luo (1983) różni się od pozostałych metod tym, że pierwszy pomiar odbywa się już w czasie poboru próbki. Nie jest to jednak możliwe dla każdej metody pomiarowej. Na przykład zastosowanie ciekłych scyntylatorów wyklucza taką możliwość, ponieważ filtr z produktami rozpadu może zostać zanurzony w scyntylatorze dopiero po pobraniu próbki.

Tabela 5. Interwały czasowe pobierania próbki zaproponowane przez różnych badaczy

Metoda	Pobór próbki	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4	Pomiar 5
	(minuty)	(minuty)	(minuty)	(minuty)	(minuty)	(minuty)
Khan i Philips (1986)	0-10	12-14	17-32	50-80	240-270	-
Zhang i Luo (1983)	0-15	0-15	16-36	37-55	155-255	375-575
Pogorski i Philips (1986)	0-10	12-14	15-30	40-70	150-210	280-330
	0-30	32-34	35-50	60-90	165-225	290-330
	0-60	62-64	65-80	90-120	185-245	290-330

Nieco inne podejście przedstawili w swoich pracach Martz i inni (1969), którzy do oznaczenia stężeń poszczególnych pochodnych radonu wykorzystali spektrometrię alfa, a nie liczniki scyntylacyjne, jak Thomas czy Nazaroff. W takim przypadku nuklidy alfa-promieniotwórcze

cze można było identyfikować bezpośrednio, co obniżało liczbę równań niezbędnych do rozwiązania. Próbkki były pobierane na filtry, których aktywność mierzono za pomocą spektrometru promieniowania alfa. Otrzymane wyniki porównano z metodą Tsivoglou (1953), co pozwoliło stwierdzić, że wyniki osiągnięte za pomocą spektrometrii alfa odznaczają się lepszą precyzją. Później modyfikowano również czasy, w których mierzono aktywność filtrów. Kerr (1975) pobierał próbki w czasie od 5 do 15 minut a pomiary aktywności prowadził między 2 a 12 minutą oraz między 15 a 30 minutą po zakończeniu pompowania. Nie był to jednak standard, gdyż inni naukowcy proponowali również inne interwały czasowe, podczas których dokonywano pomiarów aktywności filtrów za pomocą spektrometru alfa (Duggan i Howell, 1968; Jonassen i Hayes, 1974; Wang i inni, 2021; Wicke, 1979). W tabeli 6 przedstawiono szczegóły dotyczące tych metod.

Tabela 6. Interwały czasowe pobierania próbki zaproponowane przez różnych badaczy

Metoda	Pobór próbki	Pomiar 1	Pomiar 2
	(minuty)	(minuty)	(minuty)
Jonassen i Hayes (1974)	0-10	12-22	25-40
Kerr (1975)	0-10	12-22	25-40
Wicke (1979)	0-30	0-30	60-90
Wang i inni (2021)	0-30	0-30	40-60

Również spektrometria promieniowania gamma znalazła swoje zastosowanie w oznaczaniu stężeń produktów rozpadu radonu. Irfan i Fagan (1979) pobierali próbkę powietrza przez 15 minut, a następnie po 3-minutowej przerwie prowadzili osiem 4-minutowych pomiarów. Z kolei Rangarajan i inni (1974) pobierali próbki przez 1 do 10 minut, a pomiar prowadzili między 5 a 42 minutą po zakończeniu próbkowania, w zależności od czasu poboru powietrza. Zaletą tej metody, według jej autorów jest możliwość analizy próbek o dużych rozmiarach.

Detektory śladowe są zazwyczaj wykorzystywane do pomiaru stężenia radonu, a nie produktów jego rozpadu. Istnieją jednak metody, które rozszerzyły zakres ich stosowania. Wielu autorów do pomiaru produktów rozpadu radonu wykorzystało zestaw dwóch detektorów, z których pierwszy umieszczony był w komorze dyfuzyjnej i rejestrował tylko cząstki alfa emitowane przez radon, a drugi nieosłonięty był przeznaczony do rejestracji wszystkich cząstek alfa. Mankamentem tej metody są różne czułości detektora nieosłoniętego i detektora w komorze dyfuzyjnej. Na czułość tego drugiego wpływ ma wielkość i kształt komory. Inne rozwiązanie polegało na zastosowaniu kulki detektorów osłoniętych foliami o różnej grubości. Metoda ta okazała się jednak zawodna z uwagi na fakt, że na detektorach i foliach osadzały się pochodne.



Inni autorzy analizowali parametry śladu cząstki alfa i na tej podstawie wyznaczano jej energię. Wadą tej metody jest fakt, iż kształt toru zależy nie tylko od energii padania, ale także od kąta padania cząstki. Zatem ten sam ślad można uzyskać dla różnych energii cząstek alfa. Nikezic i inni (Nikezic i Baixeras, 1996; Nikezic i inni, 2004) w swych pracach nad badaniem współczynnika równowagi zaproponowali użycie nieosłoniętego detektora LR 115 do oznaczenia stężenia  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  i  $^{214}\text{Po}$ . Przedstawili także możliwość oznaczenia stężenia  $^{218}\text{Po}$  i  $^{214}\text{Bi}$  stosując wieloetapowe trawienie detektorów LR 115 (Frank i Benton, 1977; Nikezic i Yu, 2010).

Do oznaczania stężenia radonu i produktów jego rozpadu stosowane były również płyty z fosforem, które mają powszechne zastosowanie w medycynie. Technika pomiarowa polegała na pobraniu próbki powietrza na filtr przez 10 minut, a następnie 1 minutę po zakończeniu próbkowania filtr był przykładany bezpośrednio do powierzchni płyty. Ekspozycja była powtarzana 6 razy po 10 minut każda. Miejsce przylegania filtra do detektora była za każdym razem zmieniana. Łączny czas ekspozycji wynosił 60 minut. Po odczycie płyt odpowiedź z sześciu pól była analizowana celem obliczenia stężenia produktów rozpadu radonu (Iimoto i inni, 2005).

Również detektory termoluminescencyjne znalazły zastosowanie w ocenie narażenia na produkty rozpadu radonu. Stranden i inni (1983) wykorzystali zjawisko adsorpcji radonu na węglu aktywnym umieszczając detektor termoluminescencyjny (TLD) w otwartym pojemniku z węglem. Detektor rejestrował energię promieniowania beta powstającego w wyniku rozpadu zaadsorbowanego radonu. Metoda okazała się skuteczna w pomiarach trwających od kilku dni do dwóch tygodni, zarówno w domach jak i kopalniach. Niewiadomski i Ryba (1983) zaproponowali trzy rodzaje dozymetrów, w których wykorzystali komory dyfuzyjne z umieszczonymi w środku detektorami TL. Pierwszy dozymetr składał się z komory dyfuzyjnej i drugiej komory, do której mogły przenikać aerozole. Odpowiedź detektora z pierwszej komory była proporcjonalna do stężenia radonu, a drugiej do stężenia wszystkich emiterów alfa. Kolejny dozymetr był konstrukcyjnie podobny do poprzednika, a wprowadzona modyfikacja polegała na przyłożeniu potencjału elektrycznego między detektorem a ścianami komory. Dozymetr trzeci zbudowany był z dwuczęściowego metalowego cylindra, w którym górna część to komora dyfuzyjna z elektrostatycznym zbieraniem jonów, a w dolnej umieszczone było źródło wysokiego napięcia. Lebecka i inni (1982) zaprojektowali mierniki wyposażone w detektory TL do pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa w kopalniach. Miernik współpracował z py-

łomierzem wykorzystywanym rutynowo w kopalniach, dzięki czemu nie było potrzeby uzyskiwania dodatkowego dopuszczenia urządzenia do pracy w podziemnych zakładach górniczych. Idea oparta była na umieszczeniu detektorów TL, nad filtrem i rejestrowaniu energii cząstek alfa produktów rozpadu radonu, przechwyconych przez filtr. Ponieważ detektory są czułe nie tylko na promieniowanie alfa, ale także beta i gamma, w mierniku umieszczono dodatkowy zestaw detektorów za aluminiowym separatorem, w celu zredukowania udziału takiego promieniowania. W trakcie pomiaru miernik i filtr umieszczone są w separatorze ziaren zwanym mikrocyklonem, dzięki któremu tylko frakcja respirabilna dociera do filtra.

### **4.3. Urządzenia do pomiaru stężeń produktów rozpadu radonu i toronu**

Obecnie na rynku dostępne są urządzenia przeznaczone do pomiaru poszczególnych produktów rozpadu radonu i toronu, jak również do pomiaru sumarycznego stężenia energii potencjalnej alfa (tabela 7). Urządzenia te zwykle mają wbudowaną pompę do poboru próbki powietrza, detektor oraz procesor do przetwarzania wyników pomiarów. W tabeli 7 zestawiono dostępne urządzenia do pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa oraz poszczególnych produktów rozpadu radonu/toronu z możliwością wykorzystania ich w pomiarach zarówno terenowych, jak i laboratoryjnych.

Tabela 7. Dostępne urządzenia stosowane do pomiaru pochodnych radonu/toronu

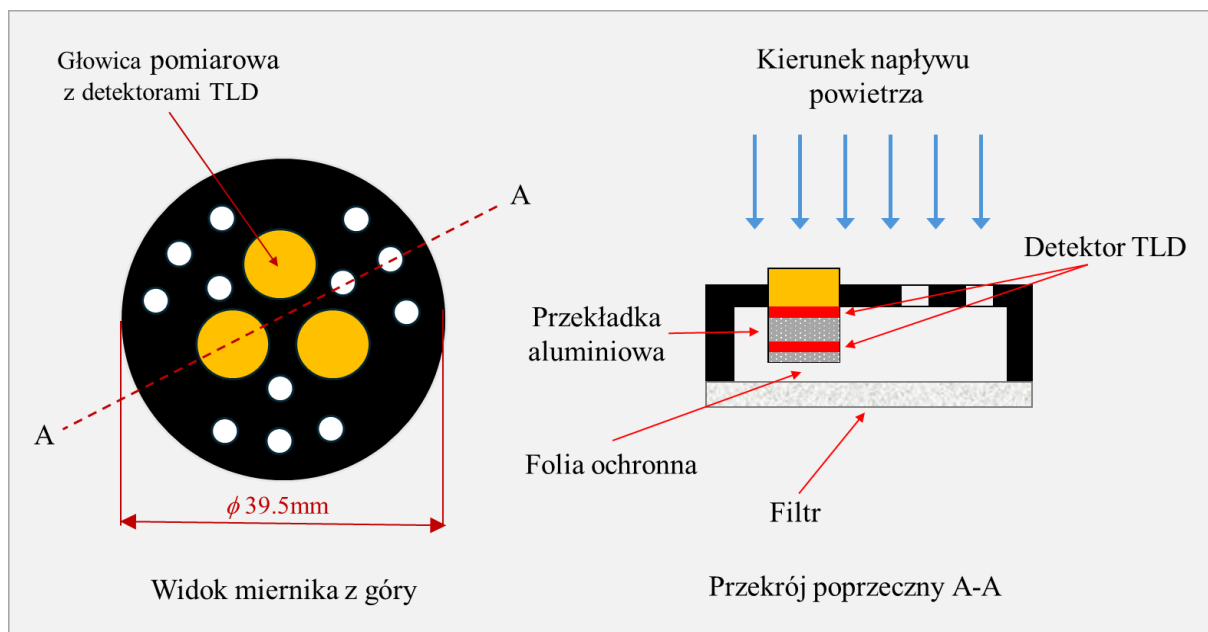
Urządzenie	Mierzona wielkość	Rodzaj detektora	Mobilność
RAD8 Durridge	Stężenie radonu/toronu i pochodnych	Spektrometria promieniowania alfa, detektor krzemowy, wbudowana pompa powietrza z przepływem 0,6 l/min.	Wymiary: 32 x 26 x 15 cm, 3,4 kg, bateria litowo-jonowa zapewniająca 3 dni ciągłej pracy.
EQF 3200/EQF 3220 Sarad	Stężenie radonu/toronu i pochodnych, stężenie energii potencjalnej alfa	Spektrometria promieniowania alfa, detektor półprzewodnikowy, stały przepływ powietrza (1,65 l/min) regulowany przez automatycznie sterowaną wbudowaną pompę.	Wymiary: 23 x 14 x 25 cm, 6 kg, bateria wewnętrzna.
DOSEman PRO Sarad	Stężenie energii potencjalnej alfa, równowagowe stężenie radonu	Spektrometria promieniowania alfa, wbudowana pompa zapewniająca przepływ 0,18 l/min.	Wymiary: 14 x 6 x 3 cm, waga 300 g, wewnętrzny akumulator umożliwia 40 h pracy.
RPM 2200 Sarad	Stężenie energii potencjalnej alfa, równowagowe stężenie radonu i toronu	Spektrometria promieniowania alfa, detektor krzemowy, wbudowana pompa zapewniająca przepływ 3 l/min.	Wymiary: 23 x 14 x 25 cm, 6 kg, wewnętrzny akumulator umożliwia 24 h pracy.
MEAP V Algade	Stężenie energii potencjalnej alfa pochodnych radonu i stężenie poszczególnych pochodnych	Do wyboru 2 metody Thomasa albo Rolle'a, zastosowano złącze krzemowe i wbudowany elektroniczny przepływomierz masowy (7 l/min).	Wymiary: 34 x 19 x 9 cm, waga 3,2 kg, bateria litowo-fosforowa zapewniająca 16 h pracy lub 40 cykli.
Radiometr górniczy RGR-40 (już nieprodukowany)	Stężenie energii potencjalnej alfa pochodnych radonu i stężenie poszczególnych pochodnych	Detektor krzemowy z barierą powierzchniową, metoda pomiaru Markowa, wbudowana pompa z przepływem 2 l/min.	Wymiary: 30 x 15 x 10 cm, 5kg, bateria zapewnia 15 cykli pracy.
Miernik ALFA z aspiratorem	Stężenie energii potencjalnej alfa pochodnych radonu	Detektory TL, wbudowana pompa zapewnia przepływ 1,9 l/min.	Wymiary: pyłomierz 20 x 10 x 3 cm, miernik 5 x 2 2 cm, waga 0,5 kg, wbudowana bateria pozwala na 8 h pracy.
Tracerlab BWLM-PLUS-2S	Stężenie radonu/toronu i pochodnych, frakcja wolna i związana	Spektrometria alfa, dwa niezależne tory pomiarowe (jeden z filtrem membranowym, drugi z siatką).	Wymiary: 32 x 35 x 15 cm, waga 9 kg, wbudowana bateria pozwala na 10 godzin pracy.

## **5. Opracowanie metody jednoczesnego pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu**

Przedstawione w poprzednich rozdziałach rozważania pozwalają sądzić, że zasadne jest opracowanie metody jednoczesnego pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu, dzięki której możliwa będzie ocena dawek skutecznych promieniowania na jakie narażeni są pracownicy kopalń. Niniejszy rozdział przedstawia opis opracowanej metody, tj. konstrukcję miernika, opis zastosowanych detektorów oraz opis matematyczny sposobu oceny stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Prezentowane urządzenie jest łatwe w obsłudze, a przez niewielkie wymiary i niską wagę nie jest problematyczne w transporcie. Ponadto urządzenie jest odporne na wysoką wilgotność i wysokie stężenie pyłu. Wbudowana bateria umożliwia pracę urządzenia przez 6-8 godzin. Czynniki te sprawiają, że opracowana metoda nadaje się idealnie do stosowania na podziemnych stanowiskach pracy.

### **5.1. Konstrukcja miernika**

Podstawowymi elementami miernika są detektory termoluminescencyjne, układ do przepompowywania powietrza i filtr przechwytyjący promieniotwórcze aerozole. Miernik może również zostać wyposażony w układ separujący, zwany cyklonem, który przepuszcza do filtra tylko aerozole tworzące frakcję respirabilną o rozmiarach do 10  $\mu\text{m}$ . Jest to klasa cząstek zdolnych do penetracji, aż do bezrzęskowego fragmentu dróg oddechowych, gdzie mogą zostać zdeponowane w obszarze wymiany gazowej. Definicję tych cząstek określa Norma (1998).



Rys. 6. Schemat miernika przeznaczonego do pomiaru stężenia energii potencjalnej produktów rozpadu radonu i toronu (opracowanie własne)

Schemat miernika przedstawiono na rys. 6. Miernik posiada trzy głowice pomiarowe, a w każdej z nich umieszczone są dwa detektory TL, oddzielone przekładką aluminiową. Głowice pomiarowe znajdują się bezpośrednio nad filtrem, a znajdujące się wewnątrz nich detektory rejestrują promieniowanie, które dociera od strony filtra, zawierającego przechwycone promieniotwórcze aerozole oraz promieniowanie tła. Detektor znajdujący się bezpośrednio nad filtrem rejestruje promieniowanie alfa, beta i gamma. Promieniowania alfa nie rejestruje drugi z detektorów, oddzielony przekładką aluminiową od pierwszego i jego wskazania służą do uwzględniania tła promieniowania. Wyposażenie miernika w trzy głowice pomiarowe z jednej strony obniża limit detekcji sygnału średniego, a z drugiej strony może niwelować niepewności związane z niejednorodnym rozłożeniem promieniotwórczych aerozoli na filtrze.

Miernik, po umieszczeniu w aspiratorze zawierającym układ pompujący, może działać przez 6-8 godzin, aż do wyczerpania akumulatorów lub znacznie dłużej, jeśli jest zasilany z sieci elektrycznej. W takim przypadku czas działania jest ograniczony wyłącznie pojemnością pyłową filtra i warunkami panującymi w miejscu pomiaru. Przepływ powietrza przez miernik zapewnia aspirator typu AP-2000EX (Two-Met, Zgierz, Polska) z regulowanym automatycznie przepływem. Przy większych oporach na filtrze działanie aspiratora zostaje przerwane, lecz informacja o czasie pomiaru jest przechowywana w pamięci urządzenia. Po zakończeniu pomiaru detektory TL są odczytywane w czytniku Harshaw 5500 (Thermofisher Scientific, Waltham, Massachusetts, USA). Obydwa urządzenia zilustrowano na rys. 7.



Aspirator AP-2000EX z cyklonem zawierającym miernik alfa

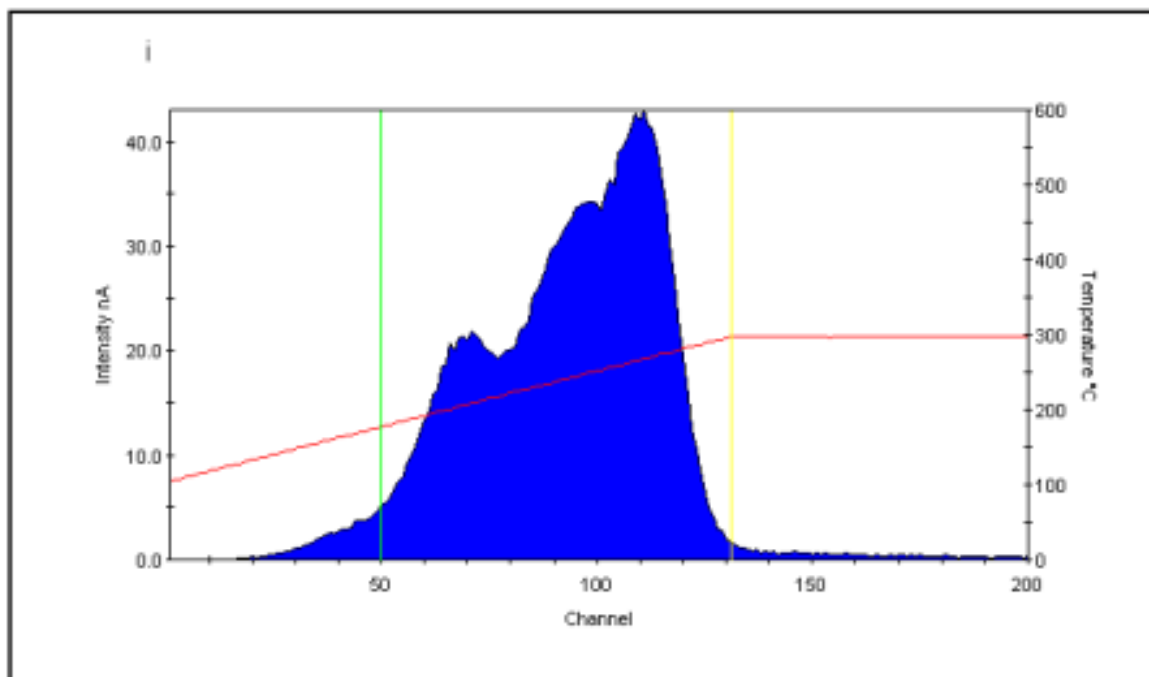
Czytnik Harshaw 5500 z płytką na detektory

Rys. 7. Aspirator AP-2000 EX i czytnik detektorów TL Harshaw-5500 (zdjęcie własne)

Najważniejszym elementem miernika są detektory termoluminescencyjne, które odpowiedzialne są za detekcję promieniowania jonizującego, emitowanego przez produkty rozpadu radonu i toronu zebrane na filtrze. Detektory termoluminescencyjne (TL) są szeroko wykorzystywane do detekcji promieniowania jonizującego zarówno w przemyśle jak i medycynie. W zależności od zastosowanego luminoforu detektory można zastosować do detekcji promieniowania neutronowego, fotonowego, beta oraz alfa. Zjawisko termoluminescencji polega na emisji światła przez luminofor, który, po napromieniowaniu został ogrzany do określonej temperatury. Zjawisko termoluminescencji zachodzi w materiałach o wysokim oporze elektrycznym (dielektryki, półprzewodniki), a mechanizm TL tłumaczy się w oparciu o pasmową teorię przewodnictwa. Zgodnie z tą teorią w materiale istnieją 3 pasma przewodnictwa; pasmo walencyjne, pasmo przewodnictwa i przerwa energetyczna (pasma wzbronione), oddzielająca te dwa pasma. Domieszki wprowadzone do materiału luminoforu sprawiają, że w paśmie zabronionym pojawiają się poziomy energetyczne. Dzięki temu zjawisku możliwe jest zajście procesów termoluminescencyjnych. Niektóre z nich mogą zostać zajęte przez elektrony oderwane z pasma walencyjnego przez promieniowanie jonizujące. Z kolei ogrzewanie luminoforu uwalnia elektrony z takich „pułapek” przenosząc je do pasma przewodnictwa. Następnie ich przejście z pasma przewodnictwa do innych, wygenerowanych przez domieszki, poziomów energetycznych wiąże się z emisją światła lub promieniowania nadfioletowego, które jest rejestrowane przez fotopowielacze (Niewiadomski, 1991; Mandowski, 2004). Sygnał ten jest proporcjonalny do pochłoniętej energii promieniowania jonizującego. W idealnych warunkach, gdyby

dotatkowe poziomy energetyczne miały tę samą energię, krzywa wyświecania podczas odczytu detektorów TL miałyby kształt pojedynczego pik. Tak jednak nie jest i krzywa składa się z kilku, niekiedy interferujących krzywych. Skrajności w postaci niskoenergetycznych lub wysokoenergetycznych pułapek są niekorzystne, bo z jednej strony ich wzbudzenie wymagałoby zastosowania dużej temperatury, co wiązałoby się z powstawaniem większej ilości promieniowania podczerwonego, a z drugiej wiązałoby się z sporą utratą informacji, już w temperaturach pokojowych.

Detektory termoluminescencyjne wykorzystywane w opisywanym mierniku wykonane są z siarczanu wapnia aktywowanego dysprozem lub tulem ( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ;  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ ). Detektory TL zostały wykonane w kształcie dysków o średnicy 5,5 mm. Luminofor o grubości około 0,2 mm został naniesiony na podłoże aluminiowe o grubości około 0,1 mm. Nieznaczna warstwa luminoforu obniża wydajność detekcji, zwłaszcza w stosunku do promieniowania gamma. Jednocześnie jego grubość jest wystarczająca do rejestracji energii cząstek alfa. Luminofor ten cechuje się dużą wydajnością termoluminescencji, w przeliczeniu na pochłoniętą energię promieniowania. Podstawowy pik w krzywej wyświecania pojawia się w temperaturze  $220^\circ\text{C}$ . Istnieją jeszcze dwa piki w temperaturze około  $100^\circ\text{C}$ , ale są silnie zależne od przypadkowych zanieczyszczeń oraz mają wyższy zanik termoluminescencji. Materiał ten charakteryzuje się również niewielkim fadingiem (zanikiem sygnału TL) termicznym i liniowością do ok. 30 Gy (Campos i Lima, 1987; Del Sol Fernández i inni, 2016). Poniżej przedstawiono przykładową krzywą TL materiału  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  (rys. 8). Środkowa część wykresu przedstawia pełną krzywą świecenia (kolor niebieski), czerwona linia wskazuje temperaturę każdego punktu. Pionowe linie służą do identyfikowania obszarów zainteresowania.



Rys. 8. Zrzut ekranu programu do akwizycji danych, krzywa wyświecania detektorów CaSO<sub>4</sub>:Dy

Zastosowanie miernika o opisanej konstrukcji nie pozwala na określenie stężenia promieniotwórczego poszczególnych produktów rozpadu radonu i toronu. Możliwy jest jednak, przy zastosowaniu odpowiedniej kalibracji, pomiar stężenia energii potencjalnej alfa, co jest kluczowe i wystarczające do oceny dawki skutecznej. Ponadto metoda ta ma następujące zalety:

- Pozwala oszacować średnie wartości stężeń PAEC w czasie jednej dniówki roboczej bez konieczności dostępu do zasilania sieciowego.
- W miejscach, gdzie dostępne jest zasilanie sieciowe można wydłużyć czas pomiaru, aż do chwili, kiedy zostanie przekroczona pojemność pyłowa filtra.
- Detektory TL nie wymagają zasilania, co w przypadku zastosowania aspiratorów już dopuszczonych do stosowania w podziemnych zakładach górniczych, pozwala na zastosowanie mierników w miejscach, gdzie są wymagane specjalne zezwolenia na ich użytkowanie.
- Detektory TL można stosować wielokrotnie, pod warunkiem, że przed każdym kolejnym pomiarem zostaną poddane określonej obróbce termicznej, która polega na ich wygrzewaniu w temperaturze 320 °C przez 15 minut.
- Urządzenie posiada niewielkie rozmiary i niewielki ciężar, co pozwala na jego zastosowanie do pomiarów indywidualnych.



## 5.2. Wyznaczanie stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu

### 5.2.1. Podstawowe zasady pomiaru

Opisana metoda pozwala na jednoczesny pomiar stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Możliwa jest również ocena stężenia energii potencjalnej alfa przy założeniu, że na filtrze znajdują się wyłącznie nuklidy związane tylko z radonem lub toronem. Ze względu na różny czas połowicznego rozpadu poszczególnych pochodnych, narastanie ich aktywności na filtrze, a później ich rozpad są znacząco różne, co wymusza pomiar w dwóch interwałach czasowych, wykonany dla tego samego filtra. Podczas pierwszego pomiaru informacja zebrana przez detektory TL dotyczy wszystkich nuklidów zebranych na filtrze. Pomiar ten kończy się po około 5 godzinach od momentu zakończenia pobierania próbki powietrza. W ten sposób detekcja obejmuje rejestrację energii cząstek alfa wyemitowanych przez pochodne radonu aż do momentu, kiedy ich wkład do sygnału można pominąć, ponieważ pięć godzin, to w przybliżeniu 10 okresów połowicznego rozpadu ołowiu  $^{214}\text{Pb}$ . Podczas tego okresu detektory TL zarejestrują również informację o energii promieniowania alfa wyemitowanego przez produkty rozpadu toronu. Podczas drugiego pomiaru, sygnał zawiera już wyłącznie informację związaną z produktami rozpadu toronu i kończy się po upływie około 7 okresów połowicznego rozpadu ołowiu  $^{212}\text{Pb}$  (74h). Te dwie informacje, jak wykazano wyżej, umożliwiają jednoczesny pomiar stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Metodę można zastosować również w przypadku innych sposobów detekcji, niekoniecznie opartych na zjawisku termoluminescencji.

W celu wykonania pomiaru energii potencjalnej alfa i stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu, jednocześnie znajdujących się na filtrze przyjęto następujące założenia:

- Interwał  $\Delta t_1$  oznacza czas, w którym detektory znajdujące się w mierniku rejestrują promieniowanie emitowane przez produkty rozpadu radonu i toronu, znajdujące się na filtrze. Rozpoczyna się w momencie rozpoczęcia przepompowywania powietrza przez filtr i obejmuje okres, w którym prawie wszystkie przechwycone produkty rozpadu radonu uległy rozpadowi (tabela 8), co oznacza, że zakończenie detekcji to moment około 5 godzin po zakończeniu pompowania powietrza przez filtr.

- Interwał  $\Delta t_2$  oznacza czas, w którym detektory znajdujące się w mierniku rejestrują promieniowanie emitowane przez produkty rozpadu toronu. Rozpoczyna się możliwie najszybciej po zakończeniu pierwszego pomiaru ( $\Delta t_1$ ) i kończy się w momencie, w którym prawie wszystkie przechwycone przez filtr produkty rozpadu toronu ulegną rozpadowi.
- Pomiar w interwale czasowym  $\Delta t_1$  i  $\Delta t_2$  może być wykonany jednym lub dwoma miernikami, które są ulokowane nad filtrem, przez który przepompowywano powietrze.
- Kalibracje mierników są prowadzone odrębnie w atmosferze radonowej i toronowej w taki sposób, aby detekcja sygnałów obejmowała cały okres, od początku przepompowywania powietrza aż do rozpadu prawie wszystkich produktów rozpadu radonu lub toronu.
- W obliczeniach stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu od sygnału otrzymanego podczas pierwszego okresu detekcji jest odejmowany udział wnoszony przez produkty rozpadu toronu, który jest proporcjonalny do sygnału z drugiego okresu detekcji. Wycięcia znajdujące się na miernikach powinny zatem znaleźć się zawsze w tym samym miejscu na obwodzie filtra tak aby skojarzone pary głowic pomiarowych miernika w każdym z tych okresów rejestrowały sygnały z tego samego fragmentu filtra, ponieważ produkty rozpadu radonu i toronu mogą być rozłożone na jego powierzchni w sposób niejednorodny.

Tabela 8. Definicja interwałów czasowych pomiaru

Wielkość	Definicja
$\Delta t_1 (t_{A1}, t_{A2})$	Miernik M1, detekcja 1, dla $t > t_{A2}$ obecność produktów rozpadu radonu jest nieistotna.
$\Delta t_2 (t_{B1}, t_{B2})$	Miernik M2, detekcja 2, na filtrze znajdują się jedynie produkty rozpadu toronu, dla $t > t_{B2}$ obecność produktów rozpadu toronu na filtrze jest nieistotna.
$\Delta t_3$	Interwał od $t_{A1}$ do $t_{B1}$ .
$\Delta t_4$	Interwał od $t_{A1}$ do $t_{B2}$ .
$\Delta t_1 (t_{A1}, t_{A2}) - \text{Detekcja 1 (Rn+Th)}$	$\Delta t_2 (t_{B1}, t_{B2}) - \text{Detekcja 2 (Th)}$
$\Delta t_3 (t_{A1}, t_{B1})$	
$\Delta t_4 (t_{A1}, t_{B2})$	

### 5.2.2. Ocena sygnału netto

W sytuacji, kiedy czas detekcji  $\Delta t_2$  detektorów zostanie dobrany tak, że na filtrze nie będą już wtedy występować produkty rozpadu radonu, to sygnał  $S_{2i}(\Delta t_2)$  zawierać będzie wyłącznie informację związaną z produktami rozpadu toronu. Do wyznaczenia stężenia energii potencjalnej toronu nie jest to jednak wystarczająca informacja, ponieważ współczynniki kalibracji dla

toronu (również dla radonu) są wyznaczone w ten sposób, że mierniki rejestrują promieniowanie od momentu rozpoczęcia filtrowania powietrza, aż do momentu, kiedy obecność produktów rozpadu toronu lub radonu na filtrze nie wpływa już w sposób istotny na wynik pomiaru czy kalibracji. W rezultacie należy oszacować wartość  $S_{X_{2Ti}}(\Delta t_4)$ , żeby wyznaczyć stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu toronu. Sygnał ten obejmuje zatem czas od początku pompowania ( $t_{A1}$ ), aż do czasu, kiedy została zakończona druga detekcja ( $t_{B2}$ ) i zawiera tylko informację związaną z produktami rozpadu toronu. Podobnie, w celu oznaczenia stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu należy wyznaczyć sygnał  $S_{X_{1Ri}}(\Delta t_1)$ , który obejmuje okres pierwszej detekcji ( $t_{A1}$ ,  $t_{A2}$ ) i zawiera informację wyłącznie związaną z produktami rozpadu radonu. Zakładając, że znane sygnały netto  $S_{1i}$  oraz  $S_{2i}$  zostały ocenione na podstawie wyników odczytów detektorów, które znajdowały się odpowiednio w miernikach M1 i M2, podczas ekspozycji w czasie  $\Delta t_1$  i  $\Delta t_2$ , można przyjąć ostatecznie, że dla i-tej głowicy pomiarowej:

$$S_{X_{1Ri}}(\Delta t_1) = S_{1i} - S_{X_{1Ti}}(\Delta t_1) \quad (5.1)$$

$$S_{X_{2Ti}}(\Delta t_4) = S_{X_{2Ti}}(\Delta t_3) + S_{2i} \quad (5.2)$$

Gdzie sygnały  $S_{X_{1Ri}}(\Delta t_1)$  oraz  $S_{X_{2Ti}}(\Delta t_4)$  są związane z obecnością tylko produktów rozpadu radonu, albo tylko produktów rozpadu toronu na filtrze podczas detekcji wykonanej za pomocą miernika M1 i M2 odpowiednio w czasie  $\Delta t_1$  i  $\Delta t_4$ . Czas detekcji  $\Delta t_1$  powinien obejmować okres od początku pompowania powietrza przez filtr, aż do momentu, kiedy produkty rozpadu radonu uległy już w praktyce całkowitemu rozpadowi (do około 5 godzin od momentu zakończenia pompowania powietrza przez filtr). Podobnie czas  $\Delta t_4$  powinien obejmować okres od początku pompowania powietrza przez filtr aż do momentu, kiedy produkty rozpadu toronu w większości się rozpadną (do około 80 godzin od momentu zakończenia pompowania powietrza przez filtr). Wówczas obliczenie tych wielkości umożliwi ocenę stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu po uwzględnieniu współczynników kalibracji, czasu pompowania i natężenia przepływu powietrza przez filtr. Uwzględniając te założenia można w oparciu o sumę energii promieniowania alfa  $E_{\alpha T}(\Delta t)$ , wypromieniowanej przez produkty rozpadu toronu w czasie  $\Delta t$  oszacować  $S_{X_{1Ti}}(\Delta t_1)$  oraz  $S_{X_{2Ti}}(\Delta t_3)$ . Stąd zachodzą relacje:

$$\frac{S_{X_{1T}}(\Delta t_1)}{S_{X_{1T}}(\Delta t_2)} = \frac{E_T(\Delta t_1)}{E_T(\Delta t_2)} \equiv R_{T1} \quad \frac{S_{X_{1Ti}}(\Delta t_2)}{S_{2i}} = \frac{K_{1Ti}}{K_{2Ti}} \quad (5.3)$$

$$\frac{S_{X_{2T}}(\Delta t_3)}{S_{2i}(\Delta t_2)} = \frac{E_T(\Delta t_3)}{E_T(\Delta t_2)} \equiv R_{T2} \quad (5.4)$$

i dalej:

$$S_{X1Ti}(\Delta t1) = R_{T1} \frac{K_{1Ti}}{K_{2Ti}} S_{2i} \quad (5.5)$$

$$S_{X2Ti}(\Delta t3) = R_{T2} S_{2i} \quad (5.6)$$

Gdzie  $K_{1Ti}$  oraz  $K_{2Ti}$  są współczynnikami kalibracji wyrażonymi w pikokulombach na mikrodziel (pC/ $\mu$ J) dla produktów rozpadu toronu, odpowiednio dla miernika M1 i M2.

Energia promieniowania alfa, wypromieniowana w czasie  $\Delta t$  ( $t_1$  do  $t_2$ ) przez produkty rozpadu toronu, znajdujące się na filtrze, charakteryzującym się współczynnikiem filtracji  $F$ , w sytuacji, kiedy czas przepompowywania powietrza wynosił  $t_p$ , przy natężeniu przepływu  $Q$  wynosi:

$$E_T(\Delta t) = FQ \left( \begin{array}{l} \left( E_{T1} \Gamma_{11}(t_p, t_1, t_2) + E_{T3} \varepsilon_{T2} \varepsilon_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{31}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4} \varepsilon_{T2} \varepsilon_{T3} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{41}(t_p, t_1, t_2) \right) \frac{C_{T1}}{\lambda_{T1}} + \\ \left( E_{T3} \varepsilon_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{32}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4A} \varepsilon_{T3} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{42}(t_p, t_1, t_2) \right) \frac{C_{T2}}{\lambda_{T2}} + \\ \left( E_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{33}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{43}(t_p, t_1, t_2) \right) \frac{C_{T3}}{\lambda_{T3}} + \\ E_{T4A} \Gamma_{44}(t_p, t_1, t_2) \frac{C_{T4A}}{\lambda_{T4A}} \end{array} \right) \quad (5.7)$$

Gdzie:

$C_{T1}$ ,  $C_{T2}$ ,  $C_{T3}$ ,  $C_{T4A}$  – stężenia promieniotwórcze produktów rozpadu toronu w powietrzu odpowiednio  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Po}$ ,

$E_{T1}$ ,  $E_{T3}$ ,  $E_{T4A}$  – energie cząstek alfa emitowane odpowiednio przez  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  i  $^{212}\text{Po}$  (tabela 2),

$\lambda_{T1}$ ,  $\lambda_{T2}$ ,  $\lambda_{T3}$ ,  $\lambda_{T4A}$  – stałe rozpadu odpowiednio dla  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Po}$  (tabela 1),

$\varepsilon_T$  – współczynniki podziału wskazujące jaka część rozpadów nuklidu z indeksem  $i-1$  prowadzi do powstania nuklidu z indeksem  $i$  (tabela 9).

Postacie funkcji  $\Gamma_{ij}$  znajdują się w dodatku 1. W celu ich obliczenia należy przyjąć, że  $\lambda_1 = \lambda_{T1}$ ,  $\lambda_2 = \lambda_{T2}$ ,  $\lambda_3 = \lambda_{T3}$ ,  $\lambda_4 = \lambda_{T4A}$ .

Tabela 9. Wartości stałych (Nuclear data, 2024)

Współczynnik podziału	Wartość	Opis
$\varepsilon_{T2}$	1	Współczynnik podziału $^{216}\text{Po}$ do $^{212}\text{Pb}$
$\varepsilon_{T3}$	1	Współczynnik podziału $^{212}\text{Pb}$ do $^{212}\text{Bi}$
$\varepsilon_{T4A}$	0,6406	Współczynnik podziału $^{212}\text{Bi}$ do $^{212}\text{Po}$
$\varepsilon_{T4B}$	0,3594	Współczynnik podziału $^{212}\text{Bi}$ do $^{208}\text{Tl}$

Ze względu na relacje czasów połowicznego rozpadu nuklidów  $^{212}\text{Bi}$  oraz  $^{212}\text{Po}$  można przyjąć, że  $C_{T4A} = \varepsilon_{T4A} C_{T3}$ , co po uwzględnieniu, że  $\varepsilon_{T2}=1$ ,  $\varepsilon_{T3}=1$  da w rezultacie:

$$E_T(\Delta t) = \text{FQ} \left( \begin{aligned} & \left( E_{T1} \Gamma_{11}(t_p, t_1, t_2) + E_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{31}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4A} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{41}(t_p, t_1, t_2) \right) \frac{C_{T1}}{\lambda_{T1}} + \\ & \left( E_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{32}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4A} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{42}(t_p, t_1, t_2) \right) \frac{C_{T2}}{\lambda_{T2}} + \\ & \left( E_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{33}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4A} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{43}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4A} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{44}(t_p, t_1, t_2) \frac{\lambda_{T3}}{\lambda_{T4A}} \right) \frac{C_{T3}}{\lambda_{T3}} \end{aligned} \right) \quad (5.8)$$

lub po uproszczeniu

$$E_T(\Delta T) = \text{FQ} \left( \varphi_1(t_1, t_2) \frac{C_{T1}}{\lambda_{T1}} + \varphi_2(t_1, t_2) \frac{C_{T2}}{\lambda_{T2}} + \varphi_3(t_1, t_2) \frac{C_{T3}}{\lambda_{T3}} \right) \quad (5.9)$$

Gdzie:

$$\varphi_1(t_1, t_2) = E_{T1} \Gamma_{11}(t_p, t_1, t_2) + E_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{31}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4A} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{41}(t_p, t_1, t_2)$$

$$\varphi_2(t_1, t_2) = E_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{32}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4A} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{42}(t_p, t_1, t_2)$$

$$\varphi_3(t_1, t_2) = E_{T3} \varepsilon_{T4B} \Gamma_{33}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{43}(t_p, t_1, t_2) + E_{T4A} \varepsilon_{T4A} \Gamma_{44}(t_p, t_1, t_2) \lambda_{T3} / \lambda_{T4A}$$

Poprawki  $R_{T1}$  i  $R_{T2}$  można przekształcić tak aby zawierały stosunki stężenia promieniotwórczego. Jeśli na przykład będą to interwały  $\Delta t1$  i  $\Delta t2$  to poprawka  $R_{T1}$  przyjmie postać

$$R_{T1} = \frac{E_T(\Delta t1)}{E_T(\Delta t2)} = \frac{\chi_1(t_{A1}, t_{A2}) \frac{C_{T1}}{C_{T2}} + \chi_2(t_{A1}, t_{A2}) + \chi_3(t_{A1}, t_{A2}) \frac{C_{T3}}{C_{T2}}}{\chi_1(t_{B1}, t_{B2}) \frac{C_{T1}}{C_{T2}} + \chi_2(t_{B1}, t_{B2}) + \chi_3(t_{B1}, t_{B2}) \frac{C_{T3}}{C_{T2}}} \quad (5.10)$$

Gdzie:

$$\begin{aligned} \chi_1(t_{A1}, t_{A2}) &= \varphi_1(t_{A1}, t_{A2}) \frac{\lambda_{T2}}{\lambda_{T1}} & \chi_2(t_{A1}, t_{A2}) &= \varphi_2(t_{A1}, t_{A2}) & \chi_3(t_{A1}, t_{A2}) &= \varphi_3(t_{A1}, t_{A2}) \frac{\lambda_{T2}}{\lambda_{T3}} \\ \chi_1(t_{B1}, t_{B2}) &= \varphi_1(t_{B1}, t_{B2}) \frac{\lambda_{T2}}{\lambda_{T1}} & \chi_2(t_{B1}, t_{B2}) &= \varphi_2(t_{B1}, t_{B2}) & \chi_3(t_{B1}, t_{B2}) &= \varphi_3(t_{B1}, t_{B2}) \frac{\lambda_{T2}}{\lambda_{T3}} \end{aligned}$$

W podobny sposób można wyznaczyć poprawkę  $R_{T2}$  przyjmując  $\Delta t3$  w miejsce  $\Delta t1$ . Współczynniki  $\varphi_i$  dla wybranych czasów detekcji nie różnią się więcej, niż o dwa rzędy wielkości podczas gdy stała rozpadu  $\lambda_{T1}$ , w porównaniu do  $\lambda_{T2}$  i  $\lambda_{T3}$ , jest przynajmniej o cztery rzędy wielkości większa, a  $\lambda_{T4}$  nawet o dziesięć rzędów wielkości większa. Stężenia nuklidów  $^{216}\text{Po}$  i  $^{212}\text{Po}$  mają zatem ograniczony wpływ na wartość współczynnika  $R_{T1}$  czy  $R_{T2}$ . Ze względu na okresy połowicznego rozpadu  $^{212}\text{Pb}$  i bizmutu  $^{212}\text{Bi}$ , najbardziej prawdopodobnym jest stan zbliżony do wiekowej równowagi promieniotwórczej, i takie współczynniki korekcyjne mogłyby zostać przyjęte do obliczeń. Uwzględniając korekty  $R_T$ , sygnały netto  $S_{1i}$  oraz  $S_{2i}$  (wyliczone w oparciu o wyniki odczytów) oraz wyznaczone współczynniki kalibracji, można ostatecznie wyznaczyć wartość sygnałów netto odnoszących się do radonu ( $S_{X1Ri}$ ) i toronu ( $S_{X2Ti}$ ):

$$S_{X1Ri}(\Delta t1) = S_{1i} - R_{T1} \frac{K_{1Ti}}{K_{2Ti}} S_{2i} \quad (5.11)$$

$$S_{X2Ti}(\Delta t4) = (1 + R_{T2}) S_{2i} \quad (5.12)$$

Sygnały netto  $S_{1i}$  oraz  $S_{2i}$  po uwzględnieniu poprawki na zanik termoluminescencji  $f$ , niestabilności pracy czytelnika  $\eta_R$ , i różnicach w czułości detektorów TL zlokalizowanych w  $i$ -tej głowicy pomiarowej  $\gamma_{ABi}$  wynoszą:

$$S_{Mi} = f \cdot \eta_R \cdot (A_{Mi} - T_{MAi} - \gamma_{MABi} \cdot B_{Mi} + \gamma_{MABi} \cdot T_{MBi}) \quad (5.13)$$

$$\sigma^2(S_{Mi}) = \alpha_M \cdot S_{Mi}^2 + \beta_M \cdot S_{Mi} + \sigma_{oMi}^2$$

Gdzie:

$$\alpha_M = \sigma^2(\eta_R) + \sigma^2(f)/f^2 \quad \beta_M = f$$

$$\sigma_{oMi}^2 = f^2 \cdot \left( \frac{T_{MAi} + \gamma_{MABi} \cdot (B_{Mi} - T_{MBi}) + \sigma^2(T_{MAi}) + \gamma_{MABi}^2 \cdot (\sigma^2(B_{Mi}) + \sigma^2(T_{MBi}))}{(B_{Mi} - T_{MBi})^2 \cdot \sigma^2(\gamma_{MABi})} \right)$$

Gdzie:

$A_{Mi}$  – wynik odczytu detektora TL znajdującego się w  $i$ -tej głowicy pomiarowej bezpośrednio nad filtrem,

$B_{Mi}$  – wynik odczytu detektora TL znajdującego się w  $i$ -tej głowicy pomiarowej za przekładką aluminiową,

$T_{MAi}$  i  $T_{MBi}$  – bieg własny tych detektorów. Indeks  $M$  wskazuje na miernik ( $M=1$  lub  $M=2$ ).

Do oceny stężenia energii potencjalnej alfa można również zastosować sumę sygnałów, uproszczoną (5.14) i bardziej złożoną (5.15):

$$S_M = f \cdot \eta_R \cdot \left( \sum_i A_{Mi} - \sum_i T_{MAi} - \overline{\gamma_{MAB}} \cdot \left( \sum_i B_{Mi} - \sum_i T_{MBi} \right) \right) \quad (5.14)$$

$$\sigma^2(S_M) = \alpha_M \cdot S_M^2 + \beta_M \cdot S_M + \sigma_{oM}^2$$

gdzie  $\overline{\gamma_{1AB}}$  jest średnią wartością poprawki gamma oraz

$$\alpha_M = \sigma^2(\eta_R) + \sigma^2(f)/f^2$$

$$\beta_M = f$$

$$\sigma_{oM}^2 = f^2 \cdot \left( \frac{\sum_i T_{MAi} + \overline{\gamma_{MAB}} \cdot \left( \sum_i B_{Mi} - \sum_i T_{MBi} \right) + \sum_i \sigma^2(T_{MAi}) + (\overline{\gamma_{MAB}})^2 \cdot \left( \sum_i \sigma^2(B_{Mi}) + \sum_i \sigma^2(T_{MBi}) \right)}{\left( \sum_i B_{Mi} - \sum_i T_{MBi} \right)^2 \cdot \sigma^2(\overline{\gamma_{MAB}})} \right)$$

$$S_M = f \cdot \eta_R \cdot \left( \sum_i A_{Mi} - \sum_i T_{MAi} - \sum_i \gamma_{MABi} B_{Mi} + \sum_i \gamma_{MABi} T_{MBi} \right) \quad (5.15)$$

$$\sigma^2(S_M) = \alpha_M \cdot S_M^2 + \beta_M \cdot S_M + \sigma_{0M}^2$$

gdzie:

$$\alpha_M = \sigma^2(\eta_R) + \sigma^2(f)/f^2$$

$$\beta_M = f$$

$$\sigma_{0M}^2 = f^2 \left( \sum_i T_{MAi} + \sum_i \gamma_{MABi} (B_{Mi} - T_{MBi}) + \sum_i \sigma^2(T_{MAi}) + \sum_i \gamma_{MABi}^2 (\sigma^2(B_{Mi}) + \sigma^2(T_{MBi})) + \sum_i (B_{Mi} - T_{MBi})^2 \sigma^2(\gamma_{MABi}) \right)$$

Wielkość poprawki uwzględniającej różnice w odpowiedzi detektorów TL na promieniowanie gamma można ocenić w następujący sposób:

$$\gamma_{MABi} = \frac{K_{\gamma MAi}}{K_{\gamma MBi}} \quad \sigma(\gamma_{MABi}) = \gamma_{MABi} \sqrt{\frac{\sigma^2(K_{\gamma MAi})}{K_{\gamma MAi}^2} + \frac{\sigma^2(K_{\gamma MBi})}{K_{\gamma MBi}^2}} \quad (5.16)$$

gdzie współczynniki kalibracji dla promieniowania gamma,  $K_{\gamma MAi}$ , określa się poprzez napromieniowanie mierników alfa w znanym referencyjnym polu promieniowania gamma i ma wymiar pC/ $\mu$ Gy.

### 5.2.3. Ocena stężenia energii potencjalnej alfa

Ocena sygnałów netto odnoszących się do radonu i toronu pozwala na obliczenie stężenia energii potencjalnej alfa dla produktów rozpadu radonu ( $C_{\alpha Ri}$ ) i toronu ( $C_{\alpha Ti}$ ) odpowiednio korzystając z zależności:

$$C_{\alpha Ri} = \frac{S_{1i} - R_{T1} \frac{K_{1Ti}}{K_{2Ti}} S_{2i}}{Qt_p K_{1Ri}} \quad (5.17)$$

$$C_{\alpha Ti} = \frac{(1 + R_{T2}) S_{2i}}{Qt_p K_{2Ti}} \quad (5.18)$$

Gdzie:

Q – natężenie przepływu powietrza przez filtr,

$t_p$  – czas poboru próbki.

Równania te wymagają jeszcze sprawdzenia jednostek, zatem jeśli stężenie energii potencjalnej alfa jest najczęściej wyrażone w ( $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ), sygnał z detektora w pC, współczynnik kalibracji w pC/ $\mu\text{J}$ , natężenie przepływu powietrza w l/min, a czasu pobierania próby w minutach, wówczas prawą stronę tych zależności należy przemnożyć przez  $10^3$ , a wariancje przez  $10^6$ . Wariancja odpowiadająca stężeniom energii potencjalnej alfa wyniesie dla produktów rozpadu radonu:

$$\sigma^2(C_{\alpha\text{Ri}}) = \omega_{1i}C_{\alpha\text{Ri}}^2 + \omega_{2i}C_{\alpha\text{Ri}} + \omega_{3i} \quad (5.19)$$

gdzie

$$\omega_{1i} = \alpha_{1i} + \frac{\sigma^2(K_{1\text{Ri}})}{K_{1\text{Ri}}^2} + \frac{\sigma^2(Q)}{Q^2} \quad \omega_{2i} = \frac{1}{K_{1\text{Ri}}} \left( 2\alpha_1 R_{T1} \frac{K_{1\text{Ti}}}{K_{2\text{Ti}}} S_{2i} + \beta_1 \right) \frac{1}{Qt_p}$$

$$\omega_{3i} = \left( \frac{1}{K_{1\text{Ri}}} \right)^2 \left( \left( R_{T1} \frac{K_{1\text{Ti}}}{K_{2\text{Ti}}} S_{2i} \right)^2 \left( \alpha_1 + \frac{\sigma^2(K_{1\text{Ti}})}{K_{1\text{Ti}}^2} + \frac{\sigma^2(K_{2\text{Ti}})}{K_{2\text{Ti}}^2} \right) + \left( R_{T1} \frac{K_{1\text{Ti}}}{K_{2\text{Ti}}} \sigma(S_{2i}) \right)^2 \right) \left( \frac{1}{Qt_p} \right)^2$$

$$+ \left( \frac{K_{1\text{Ti}}}{K_{2\text{Ti}}} S_{2i} \sigma(R_{T1}) \right)^2 + R_{T1} \frac{K_{1\text{Ti}}}{K_{2\text{Ti}}} S_{2i} \beta_1 + \sigma_{o1}^2$$

W przypadku zaś produktów rozpadu toronu wariancja jest równa:

$$\sigma^2(C_{\alpha\text{Ti}}) = \omega_{1i}C_{\alpha\text{Ti}}^2 + \omega_{2i}C_{\alpha\text{Ti}} + \omega_{3i} \quad (5.20)$$

gdzie

$$\omega_{1i} = \alpha_{2i} + \frac{\sigma^2(R_{T2})}{(1 + R_{T2})^2} + \frac{\sigma^2(Q)}{Q^2} \quad \omega_{2i} = \frac{(1 + R_{T2})}{K_{2\text{Ti}}} \beta_2 \frac{1}{Qt_p} \quad \omega_{3i} = \left( \frac{1 + R_{T2}}{K_{2\text{Ti}}} \right)^2 \sigma_{o2i}^2 \left( \frac{1}{Qt_p} \right)^2$$

Warto zauważyć, że możliwe są różne scenariusze pomiarowe. Zawsze jednak podstawą do wykonania obliczeń są wyprowadzone wyżej równania, po przyjęciu określonych założeń. Można tutaj rozpatrywać następujące warianty:

- Na filtrze obecne są wyłącznie produkty rozpadu radonu lub wyłącznie produkty rozpadu toronu.
- Różnice w wartościach współczynników kalibracji określone dla tego samego miernika w odniesieniu do produktów rozpadu radonu i toronu są statystycznie nieistotne i można przyjąć, że  $K_T = K_R$ .
- Pomiar aktywności nuklidów promieniotwórczych zgromadzonych na filtrze zostały wykonane w poszczególnych interwałach czasowych za pomocą tego samego miernika. Wówczas można przyjąć, że  $K_{2T} = K_{1T}$  oraz  $K_{2R} = K_{1R}$ .



Wybranie do oceny stężenia energii potencjalnej alfa sygnału sumarycznego implikuje pewne zmiany, a mianowicie w powyższych zależnościach należy uwzględnić sumy współczynników kalibracji określonych dla poszczególnych głowic pomiarowych.

#### 5.2.4. Ocena statystyczna

Przyjmując, że  $C_{\alpha CL}$  jest wypadkową wartością krytyczną stężenia energii potencjalnej alfa radonu lub toronu, a  $C_{\alpha}$  jego wypadkową wartością można określić przedziały ufności zgodnie z następującymi kryteriami (Currie, 1968):

- $C_{\alpha} \leq C_{\alpha CL}$ , co oznacza, że nie zarejestrowano promieniowania, a wartość rzeczywista  $C_{\alpha P}$  mierzonych wielkości jest dla przyjętego poziomu ufności ograniczona z góry:

$$C_{\alpha P} \leq C_{\alpha} + k_1 \sigma(C_{\alpha}) \quad (5.21)$$

- $C_{\alpha} > C_{\alpha CL}$ , co oznacza, że zarejestrowano promieniowanie, a wartość rzeczywista  $C_{\alpha P}$  mierzonych wielkości mieści się, dla przyjętego poziomu ufności (test dwustronny), w przedziale:

$$C_{\alpha P} = C_{\alpha} \pm k_2 \sigma(C_{\alpha}) \quad (5.22)$$

gdzie  $k_1$  i  $k_2$  są wartościami krytycznymi zmiennej zredukowanej odpowiednio dla testu jednostronnego i dwustronnego i przyjętego poziomu ufności.

Poziomy krytyczne i limity detekcji wielkości  $X_i$  wynoszą:

$$X_{CLi} = k_1 \sigma(X_i = 0) \quad X_{DLi} = X_{CLi} + k_2 \sigma(X_i = X_{DLi}) \quad (5.23)$$

Wariancję każdej z wielkości, czy to jest sygnał, czy stężenie energii potencjalnej alfa, można wyrazić w postaci:

$$\sigma^2(X_i) = \psi_{1i} X_i^2 + \psi_{2i} X_i + \psi_{3i} \quad (5.24)$$

Stąd poziom krytyczny i limit detekcji są równe:

$$X_{CLi} = k_1 \sqrt{\psi_{3i}} \quad X_{DLi} = X_{CLi} + k_2 \sqrt{\psi_{1i} X_{DLi}^2 + \psi_{2i} X_{DLi} + \psi_{3i}} \quad (5.25)$$

W przypadku, kiedy bieg własny dla sygnału nie jest dobrze określony („paired observation”), to  $k_1 \rightarrow \sqrt{2} \cdot k_1$  (Currie, 1968). W celu określenia limitu detekcji należy rozwiązać równanie kwadratowe:

$$X_{DLi} = \frac{2X_{CLi} + k_2^2\psi_{2i} + k_2\sqrt{4\psi_{3i} + k_2^2(\psi_{2i}^2 - 4\psi_{1i}\psi_{3i})} + 4X_{CLi}(\psi_{2i} + \psi_{1i}X_{CLi})}{2(1 - k_2^2\psi_{1i})} \quad (5.26)$$

Stąd można wyliczyć te wielkości dokonując odpowiednich podstawień:

$$\text{Sygnał:} \quad \psi_{1i} = \alpha_M \quad \psi_{2i} = \beta_M \quad \psi_{3i} = \sigma_{OMi}^2$$

$$\text{Stężenie energii potencjalnej alfa:} \quad \psi_{1i} = \omega_{1i} \quad \psi_{2i} = \omega_{2i} \quad \psi_{3i} = \omega_{3i}$$

Możliwości pomiarowe metody są w dużym stopniu zdeterminowane przez zastosowane detektory TL (czułość detektora i bieg własny), czytniki detektorów TL, urządzenia wykorzystywane podczas kalibracji (pompy, przepływomierze) oraz sam miernik stężenia energii potencjalnej alfa. Wpływ na wyniki ma również opracowana metoda pomiarowa. Współczynniki kalibracji dla produktów rozpadu radonu i toronu uzyskane za pomocą systemu pomiarowego są na poziomie około 600 pC/μJ i zostały oznaczone z niepewnością zwykle nie przekraczającą 10% (1σ). W tabeli 10 przedstawiono możliwości pomiarowe miernika określone dla poziomu istotności 0,05 i poziomu ufności 0,95 (2k), czasu pompowania 10 godzin z natężeniem przepływu 2 l/min, pierwszej detekcji zrealizowanej w czasie 9-15 godzin i drugiej detekcji w czasie 16 – 95 godzin. Niższe limity detekcji, poziomy krytyczne jak i niepewności pomiarowe uzyskuje się dla produktów rozpadu toronu. Wynika to z różnic w czasach połowicznego rozpadu i sposobu detekcji. W przypadku, kiedy stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu toronu rośnie w stosunku do udziału jaki wnoszą produkty rozpadu radonu, nuklidy pochodzące od toronu są w większym stopniu czynnikiem zakłócającym podczas pierwszej detekcji. Z kolei podczas drugiej detekcji na filtrze znajdują się już wyłącznie produkty rozpadu toronu. Jeśli stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu są porównywalne, rzędu 1 μJ/m<sup>3</sup> to wartość ta może zostać zmierzona z precyzją 17% i 15% odpowiednio dla poziomu ufności 0,95 (2k).

Tabela 10. Możliwości pomiarowe miernika określone dla typowych wartości zastosowanego układu pomiarowego

L.p.	Stężenie PAEC		Poziom krytyczny		Limit detekcji		Niepewność	
	$(\mu\text{J}/\text{m}^3)$		$(\mu\text{J}/\text{m}^3)$		$(\mu\text{J}/\text{m}^3)$		( $\%$ )	
	Radon	Toron	Radon	Toron	Radon	Toron	Radon	Toron
1.	1,00	1,00	0,09	0,07	0,21	0,17	17,00	14,80
2.	1,00	2,00	0,15	0,07	0,34	0,17	22,20	11,80
3.	1,00	3,00	0,21	0,07	0,45	0,17	28,40	11,00
4.	3,00	2,00	0,15	0,07	0,34	0,17	13,80	11,80
5.	3,00	1,00	0,09	0,07	0,21	0,17	12,80	14,80
6.	3,00	0,50	0,07	0,07	0,15	0,17	12,50	21,90

## 6. Kalibracja mierników

Aby umożliwić ocenę stężenia energii potencjalnej alfa za pomocą detektorów TL umieszczonych w mierniku, konieczne jest przeprowadzenie procedury kalibracji, w wyniku której zostaną wyznaczone współczynniki kalibracji. Kalibracja mierników polega na ustaleniu relacji między wskazaniem (odczytami) kalibrowanego urządzenia, a wartością referencyjną. Na ogół procedurę kalibracji przeprowadza się w oparciu o wzorce odniesienia. Taki schemat można zastosować w przypadku urządzeń służących do pomiaru stężenia radonu, jednak w przypadku urządzeń mierzących PAEC produktów rozpadu radonu czy toronu, nie jest to wystarczające. Konieczny jest wówczas pomiar stężeń promieniotwórczych  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$ . Dlatego zdecydowano się na zastosowanie spektrometru ciekłoscyntylacyjnego do wyznaczenia wartości referencyjnej PAEC. Ponieważ wydajność detekcji spektrometru ciekłoscyntylacyjnego dla promieniowania alfa wynosi 100%, a dla promieniowania beta 98%, przyjęto, że metoda ta z powodzeniem może być wykorzystywana do wyznaczania wartości referencyjnej. Niniejszy rozdział przedstawia opis przebiegu całej procedury kalibracji mierników oraz uzyskane wyniki. Kalibracje wykonano w komorze radonowej Śląskiego Centrum Radiometrii GIG-PIB.

### 6.1. Procedura kalibracyjna

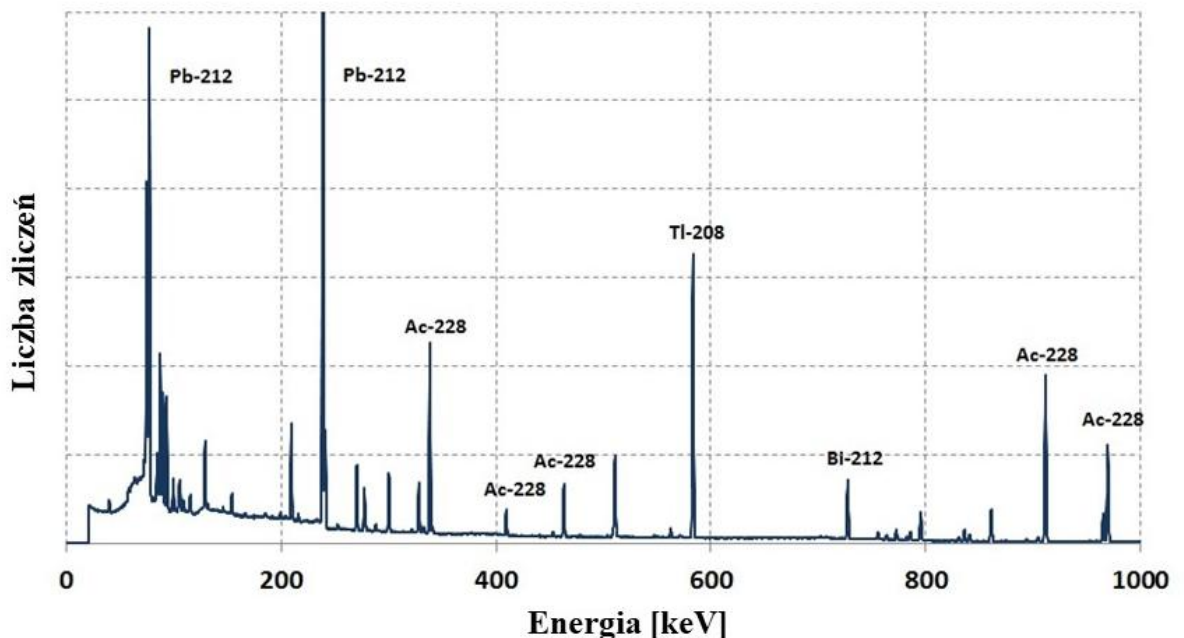
Procedurę kalibracji przeprowadzono w komorze radonowej o pojemności  $17\text{ m}^3$ . Zastosowane rozwiązania techniczne umożliwiają manipulowanie obiektami znajdującymi się w komorze z zewnątrz, za pomocą śluzy i otworów z rękawicami (rys. 9).



Rys. 9. Komora radonowa Śląskiego Centrum Radiometrii GIG-PIB

Proces kalibracji podzielono na następujące etapy:

- Uruchamiano źródło radonowe lub toronowe. Przepływowe źródło firmy Pylon Electronics (Ottawa, Kanada) zawiera rad  $^{226}\text{Ra}$  o aktywności 256 kBq (na dzień 13.01.1993), którego rozpad prowadzi do powstawania radonu. W izolowanym układzie po około 30 dniach między tymi nuklidami ustala się wiekowa równowaga promieniotwórcza i ilość radonu w źródle osiąga maksymalną wartość. Po przyłączeniu pompy do źródła następuje transfer nagromadzonego radonu do komory radonowej. Z kolei źródło toronowe zostało wykonane w Śląskim Centrum Radiometrii GIG-PIB w oparciu o chlorek toru ( $\text{ThCl}_4$ ). Transfer toronu do komory przebiegał poprzez wymuszenie przepływu powietrza przez roztwór znajdujący się w płuczce gazowej. Wówczas w tworzących się bąbelkach toron był transferowany do komory. Natężenie przepływu powietrza przez roztwór wynosiło około 2 l/min. Aktywność radu  $^{228}\text{Ra}$  wynosiła około 300 Bq/g roztworu, co zostało zmierzone za pomocą spektrometrii promieniowania gamma na podstawie aktynu  $^{228}\text{Ac}$  (rys. 10). Wykorzystano 50 ml chlorku toru. Tor transmisyjny toronu został zabezpieczony dwiema płuczkami laboratoryjnymi i suszką, żeby uniemożliwić przedostawanie się cząstek samego roztworu do wnętrza komory.



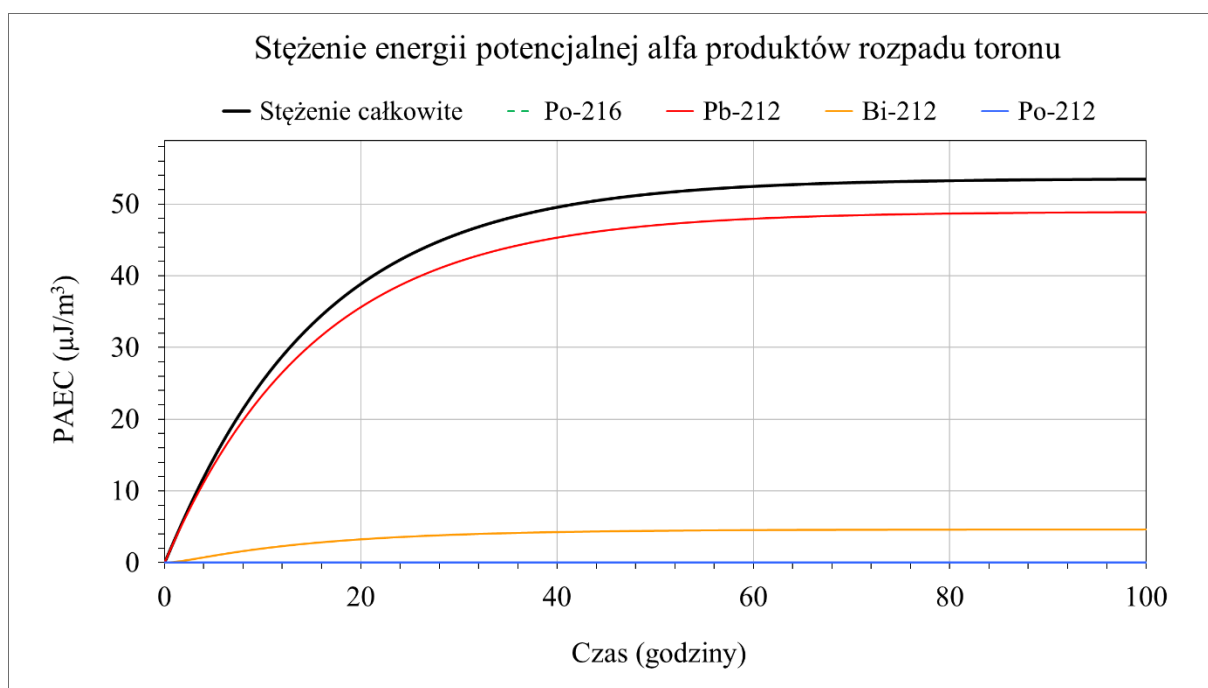
Rys. 10. Widmo promieniowania gamma chlorku toru stosowanego jako źródło toronu

- Aerozole wytwarzano za pomocą podgrzewaczy woskowych. Wraz z rozpoczęciem generowania aerozoli włączano wentylator w celu zapewnienia jednorodnej atmosfery wewnątrz komory i po około godzinie rozpoczynano kalibrację.

- W komorze umieszczano kalibrowany miernik z detektorami TL oraz urządzenie do pomiaru referencyjnego stężenia energii potencjalnej alfa. Zarówno miernik, jak i urządzenie referencyjne były wyposażone w filtry. Stabilizowane natężenie przepływu powietrza Q przez filtry zapewniały aspiratory AP-2000 EX. Obydwa urządzenia uruchomiane były jednocześnie, a czas pobierania próby  $t_p$  był taki sam. W przypadku procedury realizowanej w atmosferze radonowej całkowity czas pompowania wynosił 1 godzinę. Stężenie referencyjne wyznaczano w tym czasie dwukrotnie w dwóch kolejnych półgodzinnych sesjach pomiarowych. W atmosferze toronowej pomiar stężenia energii potencjalnej alfa trwał 1 godzinę. Do oceny referencyjnego stężenia stosowano filtry membranowe celulozowe Pragopor 4 (Pragochema, Praga, Czechy) o rozmiarach porów  $0,8 \mu\text{m}$ . W mierniku kalibrowanym znajdowały się zazwyczaj filtry Fipro z włókien polipropylenowych (Instytut Włókiennictwa, Łódź, Polska). W celach porównawczych zastosowano również w tych miernikach filtry Pragopor4 oraz poliwęglanowe filtry membranowe Millipore (Merck KGaA, Darmstadt, Niemcy), o średnicy otworów przelotowych  $0,8 \mu\text{m}$ .
- Po zakończeniu pompowania filtr referencyjny zanurzano w ciekłym scyntylatorze i dokonywano oceny jego aktywności w kolejnych interwałach czasowych za pomocą spektrometru Triathler (Hidex Oy, Turku, Finlandia), co pozwalało na ocenę stężenia energii potencjalnej alfa wewnątrz komory radonowej ( $C_a$ ). Fiolka, w której zanurzano filtr zawierała 10 ml scyntylatora toluenowego beztritonowego. Interwały czasowe zależały od tego, czy kalibracja odbywa się w atmosferze radonowej czy toronowej (tabela 12). W przypadku atmosfery radonowej pobieranie próbki trwało 30 minut, a aktywność nuklidów zebranych na filtrze mierzona była w trzech interwałach czasowych: 32-35 minut, 36-50 minut i 51-60 minut.  
W przypadku atmosfery toronowej, próbka była pobierana przez 60 minut, a pomiar aktywności nuklidów zgromadzonych na filtrze odbywał się między 65 a 125 minutą i między 130 a 250 minutą.
- Po określonym czasie dokonywano odczytu detektorów TL za pomocą czytnika Hars-haw 5500, co pozwalało na ocenę sygnałów netto S. Czasy między zakończeniem pomiaru w komorze, a odczytem zależały od tego, czy kalibracja odbywała się w atmosferze radonowej czy toronowej. Współczynnik kalibracji wyznaczano jako  $K=S/(Qt_pC_a)$ .

## 6.2. Produkty rozpadu radonu i toronu w komorze radonowej

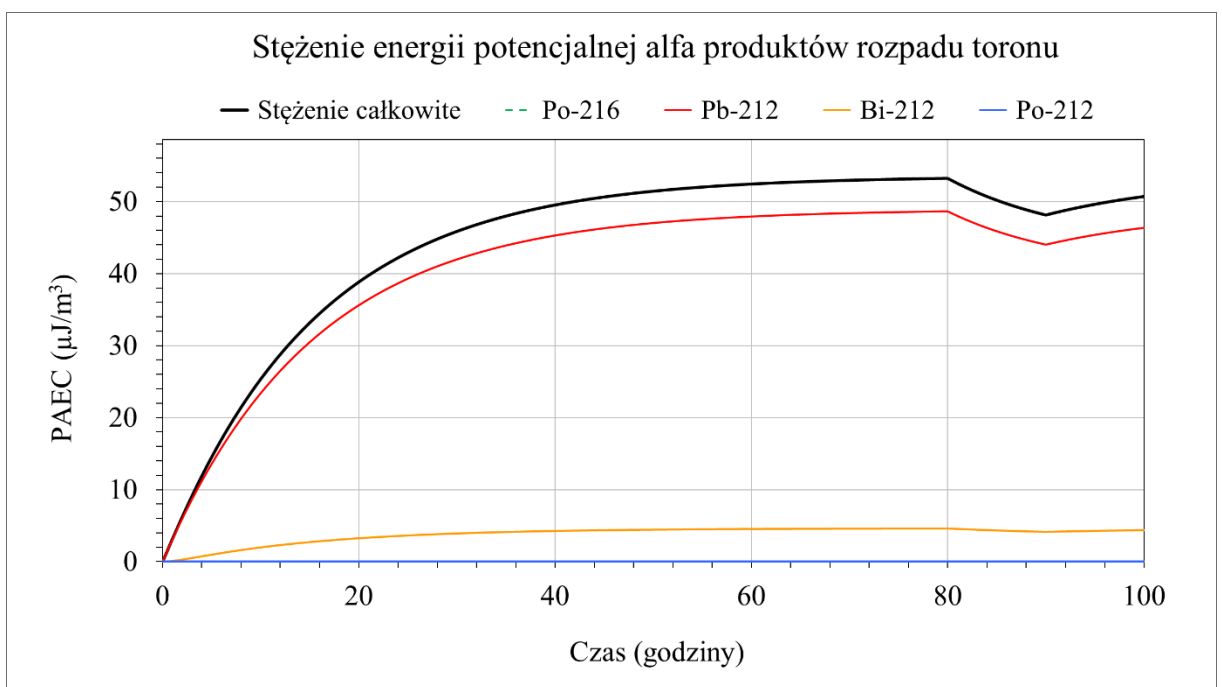
Wytworzenie atmosfery toronowej o odpowiednio wysokim stężeniu produktów rozpadu toronu w komorze, o pojemności  $17 \text{ m}^3$  wymaga zastosowania odpowiednio silnego źródła. Ze względu na mały okres połowicznego rozpadu toronu, wytworzenie stabilnej atmosfery w komorze nie zostanie zapewnione wskutek jednokrotnego wstrzyknięcia nuklidu, czy też jego krótkotrwałej transmisji z roztworu. Toron szybko się bowiem rozpadnie. Rozwiązaniem jest stały dopływ toronu z odpowiednio dużą szybkością. Zgodnie z jednym z przeprowadzonych pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa toronu jego wartość wyniosła około  $55 \mu\text{J}/\text{m}^3$ . Wykorzystując rozwiązanie dotyczące sposobu narastania stężenia nuklidów radonu lub toronu w obiektach zamkniętych (Skubacz i Michalik, 2022) można wnioskować, że osiągnięcie takiego poziomu stężenia wymaga stałego dozowania toronu do komory z szybkością  $150 \text{ Bq/s}$ . Wówczas po około 80 godzinach od początku transferu toronu, stężenie PAEC osiągnie tę wartość (rys. 11).



Rys. 11. Zmiany stężenia energii potencjalnej alfa w komorze o pojemności  $17 \text{ m}^3$  w wyniku stałego transferu toronu ze źródła z szybkością  $150 \text{ Bq/s}$

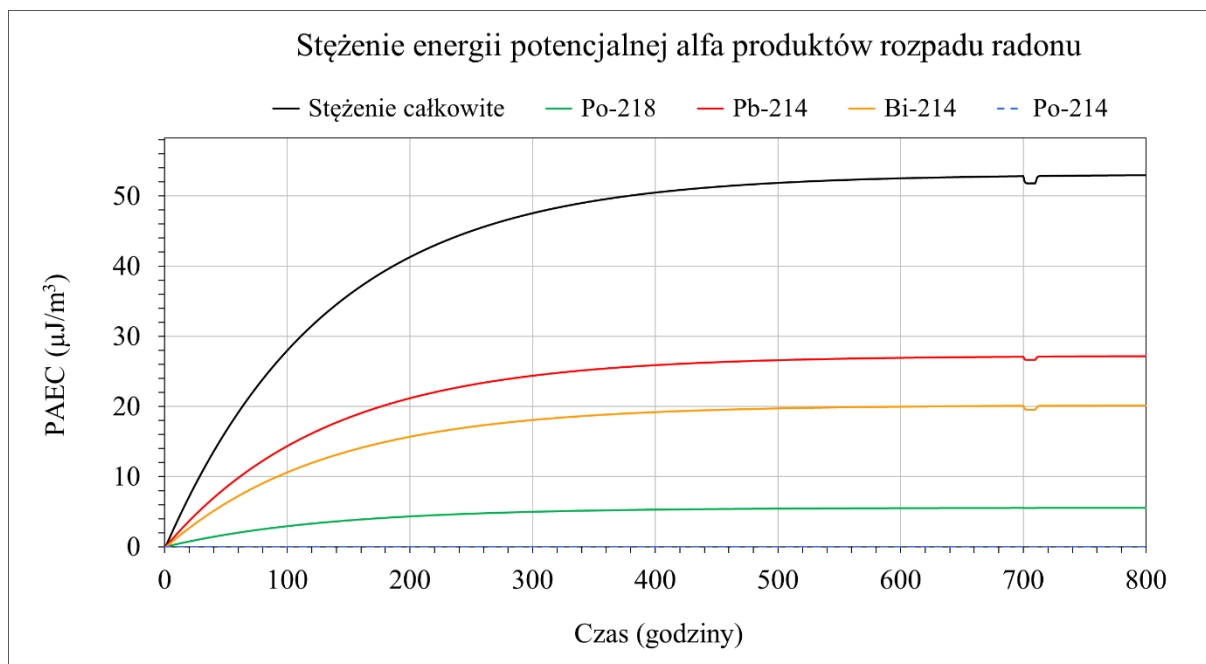
Duża komora radonowa zapewnia względną stabilność wartości stężeń nuklidów pod warunkiem, że przepływ powietrza w kalibrowanym urządzeniu czy urządzeniu referencyjnym nie jest zbyt duży. Przepływy w obydwu urządzeniach wynosiły około  $2 \text{ l}/\text{min}$ , a czas ich działania 60 minut, co oznacza, że w tym czasie przefiltrowane zostało  $0,24 \text{ m}^3$  powietrza. W porównaniu do objętości komory wynoszącej  $17 \text{ m}^3$  nie jest to dużo. Potwierdza to przebieg zmian wartości

stężen PAEC w komorze, kiedy obydwa urządzenia przy stałym dopływie toronu z szybkością 150 Bq/s działały między 80, a 90 godziną, co nie spowodowało poważnych zakłóceń atmosfery (rys. 12). Podobną sytuację obserwuje się dla radonu. Osiągnięcie takiego poziomu stężenia w przypadku radonu zostałyby uzyskane przy dopływie tego nuklidu z szybkością 0,35 Bq/s. Zmierzone stężenia produktów rozpadu radonu wynosiły jednak około  $30 \mu\text{J}/\text{m}^3$ , co oznacza, że oszacowana wydajność źródła Pylon w komorze wynosiła około 0,12 Bq/s. W porównaniu z toronem, znacznie niższa wydajność źródła wystarcza do osiągnięcia porównywalnych stężeń energii potencjalnej alfa, co wynika z różnic w czasach połowicznego rozpadu. Ponadto urządzenia filtrujące w znacznie mniejszym stopniu zakłócają stężenia (rys. 13). W każdym jednak przypadku zmiany w stężeniach energii potencjalnej alfa byłyby znacznie większe dla obiektów o mniejszej objętości. Niezależnie od objętości komory, poziom nasycenia w przypadku radonu zostanie osiągnięty po około 600-700 godzinach, a dla toronu po upływie 80 godzin od rozpoczęcia transferu tych nuklidów do komory ze stałą wydajnością.



Rys. 12. Zmiany stężenia energii potencjalnej alfa w komorze o pojemności  $17 \text{ m}^3$  w wyniku stałego transferu toronu ze źródła z szybkością 150 Bq/s, w sytuacji, kiedy między 80 a 90 godziną działały urządzenia filtrujące z łącznym natężeniem przepływu  $4 \text{ l}/\text{min}$  i wydajnością filtracji 100%





Rys. 13. Zmiany stężenia energii potencjalnej alfa w komorze o pojemności 17 m<sup>3</sup> w wyniku stałego transferu radonu ze źródła z szybkością 0,35 Bq/s, w sytuacji, kiedy między 700 a 710 godziną działały urządzenia filtrujące z łącznym natężeniem przepływu 4 l/min i wydajnością filtracji 100%

### 6.3. Ocena referencyjnego stężenia energii potencjalnej alfa

W czasie przepompowywania powietrza przez filtr związki między aktywnością nuklidów  $A_i$  zgromadzonych na filtrze, a ich stężeniem promieniotwórczym w powietrzu  $C_i$  opisywane są przez następujące równania:

$$\frac{\partial A_1(t)}{\partial t} = FQC_1 - \lambda_1 A_1(t) \quad \text{oraz} \quad \frac{\partial A_i(t)}{\partial t} = FQC_i + \varepsilon_i \lambda_i A_{i-1}(t) - \lambda_i A_i(t) \quad \text{dla } i \geq 2 \quad (6.1)$$

Gdzie:

$Q$  – natężenie przepływu powietrza przez filtr,

$F$  – wydajność filtracji,

$\lambda_i$  – stała rozpadu  $i$ -tego nuklidu.

Poszczególne produkty rozpadu radonu i toronu, powstają w wyniku rozpadu nuklidów, które je poprzedzają w szeregu. Stąd w równaniach różniczkowych należy uwzględnić współczynniki podziału  $\varepsilon_i$  wskazujące jaką część nuklidu macierzystego prowadzi do powstania nuklidu pochodnego. Ma to znaczenie jedynie w przypadku produktów rozpadu toronu. Dla produktów rozpadu radonu można przyjąć, że wszystkie z nich są równe 1. Rozwiązania tych równań (6.1) można zapisać w postaci:

$$A_i(t) = FQ \sum_{j=1}^i \left( \left( \prod_{k=j+1}^i \varepsilon_k \right) \frac{F_{ij}(t) C_j}{\lambda_j} \right) \quad (6.2)$$

Gdzie postacie funkcji  $F_{ij}$  zamieszczono w dodatku do pracy. W momencie zakończenia pompowania do filtra nie będą już docierać produkty rozpadu znajdujące się w powietrzu, a nuklidy zgromadzone na filtrze będą dalej ulegać przemianom zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego, z tym, że aktywność początkowa będzie wynosić  $A_i(t_p)$ , gdzie  $t_p$  jest czasem pobierania próby powietrza. Wówczas aktywności nuklidów  $A_i'$  na filtrze będą się zmieniać zgodnie z równaniami:

$$A_i'(t) = \sum_{j=1}^i \left( \left( \prod_{k=j+1}^i \varepsilon_k \right) G_{ij}(t) A_j(t_p) \right) \quad (6.3)$$

Gdzie postacie funkcji  $G_{ij}$  zostały zamieszczone w dodatku do pracy.

Liczba zarejestrowanych zliczeń  $\mathfrak{R}_i$  przez układ pomiarowy zależy od aktywności nuklidów znajdujących się na filtrze, wydajności detekcji i czasu detekcji. Jeśli detekcja przebiega podczas pobierania próbki powietrza, to wielkości  $\mathfrak{R}_i$  będą proporcjonalne do całek z wielkości (6.2), a jeśli rozpoczyna się po zakończeniu pompowania, to całek z wielkości (6.3). Może się też zdarzyć, że czas detekcji zawiera się częściowo w czasie pompowania i po jego zakończeniu. Wówczas przedział całkowania należy odpowiednio rozdzielić na dwa przedziały, z których jeden kończy się wraz z końcem poboru próbki, a drugi się wtedy rozpoczyna. Od systemu pomiarowego zależy również, które z zależności 6.2 bądź 6.3 należy uwzględnić. Każda z nich jest bowiem związana z określonym nuklidem, a zatem również z określonym rodzajem promieniowania. Najogólniej, liczba zarejestrowanych zliczeń w określonym przedziale czasu  $\Delta t = (t_1, t_2)$  w wyniku emisji promieniowania przez  $i$ -ty nuklid, jest równa:

$$\mathfrak{R}_i = \eta_{Di} \left( \int_{t_1}^{t_p} A_i(t) dt + \int_{t_p}^{t_2} A_i'(t) dt \right) \quad (6.4)$$

Gdzie:

$\eta_{Di}$  – wydajność detekcji promieniowania emitowanego przez  $i$ -ty nuklid.

W zależności od sytuacji należy dokonać zsumowania wielkości  $\mathfrak{R}_i$  dla tych nuklidów, których promieniowanie rejestruje układ pomiarowy, aby otrzymać wynik odpowiadający odpowiedzi uzyskanej przez zastosowane urządzenie. Po rozwinięciu, tę zależność można również przedstawić w następującej postaci:

$$\mathfrak{R}_i(t_p, t_1, t_2) = \eta_{DI} \text{FQ} \left( \sum_{j=1}^i \left( \left( \prod_{k=j+1}^i \varepsilon_k \right) \Gamma_{ij}(t_p, t_1, t_2) \frac{C_j}{\lambda_j} \right) \right) \quad (6.5)$$

Postacie funkcji  $\Gamma_{ij}$  zostały zamieszczone w dodatku do pracy. Relacje te składają się na układ równań, który należy rozwiązać, żeby ocenić wielkości stężeń  $C_j$  nuklidów w powietrzu, co z kolei umożliwi wyznaczenie referencyjnego stężenia energii potencjalnej alfa. Liczba interwałów czasowych, w których należy wykonać pomiar aktywności filtra zależy od liczby nuklidów, których stężenie należy wyznaczyć. Ostatecznie rozwiązanie to uzyskuje się poprzez odwrócenie macierzy utworzonej w oparciu o równanie (6.5) dla różnych czasów detekcji.

Pomiar aktywności nuklidów zgromadzonych na filtrze wykonano za pomocą ciekłych scyntylatorów. W tej metodzie detekcji podlega promieniowanie alfa i beta. W przypadku radonu wskazano cztery nuklidy jako produkty jego rozpadu, co implikowałoby konieczność uwzględnienia 4-wymiarowej macierzy. Ze względu na stosunek czasów połowicznego rozpadu można założyć, że polon  $^{214}\text{Po}$  pozostaje w równowadze promieniotwórczej z bizmutem  $^{214}\text{Bi}$ , co w rezultacie upraszcza cały problem i wystarczające jest wyznaczenie tylko trzech stężeń promieniotwórczych:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ . Podobnie jest w przypadku toronu. W sumie należy dokonać pomiaru 5 nuklidów:  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Po}$  i  $^{208}\text{Tl}$ . Udział pierwszego z nich można jednak zaniedbać, ze względu na mały czas połowicznego rozpadu. Z kolei polon  $^{212}\text{Po}$  będzie pozostawać w quasi równowadze promieniotwórczej z bizmutem  $^{212}\text{Bi}$ , jednak po uwzględnieniu współczynnika podziału aktywność polonu będzie równa około 0,64 aktywności bizmutu. W rezultacie wystarczy w tym wypadku uwzględnić macierz 3-wymiarową. Mniej oczywistym może być przyjęcie założenia, że w quasi równowadze promieniotwórczej znajdują się bizmut  $^{212}\text{Bi}$  i tal  $^{208}\text{Tl}$  ( $C_{\text{Tl-208}}=0,36 \cdot C_{\text{Bi-212}}$ ). Jednak w tym przypadku czas połowicznego rozpadu  $^{208}\text{Tl}$  jest mniejszy od czasu połowicznego rozpadu  $^{212}\text{Bi}$ . Ponadto nuklid ten wpływa w niewielkim stopniu na wyniki pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa. W tabeli 11 przedstawiono wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa, jeśli dla tej samej próby wzięto pod uwagę pomiar aktywności filtra wykonany w dwóch i trzech interwałach czasowych.

Tabela 11. Stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu toronu wykonanego dla tych samych próbek z uwzględnieniem dwóch lub trzech interwałów czasowych

Próba	2 interwały czasowe	3 interwały czasowe
	$C_\alpha$ ( $\mu\text{J}/\text{m}^3$ )	$C_\alpha$ ( $\mu\text{J}/\text{m}^3$ )
1	$42,2 \pm 1,2$	$42,0 \pm 1,2$
2	$42,7 \pm 1,3$	$43,1 \pm 1,3$
3	$54,4 \pm 1,6$	$54,6 \pm 1,6$

W rezultacie tak przyjętych założeń pomiar referencyjnego stężenia produktów rozpadu radonu prowadzono w trzech interwałach czasowych, a produktów rozpadu toronu w dwóch. Obydwie sekwencje pomiarowe zostały przedstawione w tabeli 12.

Tabela 12. Sekwencja pomiarowa stężeń produktów rozpadu radonu i toronu

Metoda	Pobór próbki	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
	(minuty)	(minuty)	(minuty)	(minuty)
Produkty rozpadu radonu	0-30	32-35	36-50	51-60
Produkty rozpadu toronu	0-60	65-125	130-250	-
Wydajność filtracji: $0,99 \pm 0,01$ , wydajność detekcji promieniowania alfa: $1,00 \pm 0,01$ wydajność detekcji promieniowania beta: $0,98 \pm 0,01$				

#### 6.4. Frakcja wolna produktów rozpadu radonu w komorze radonowej

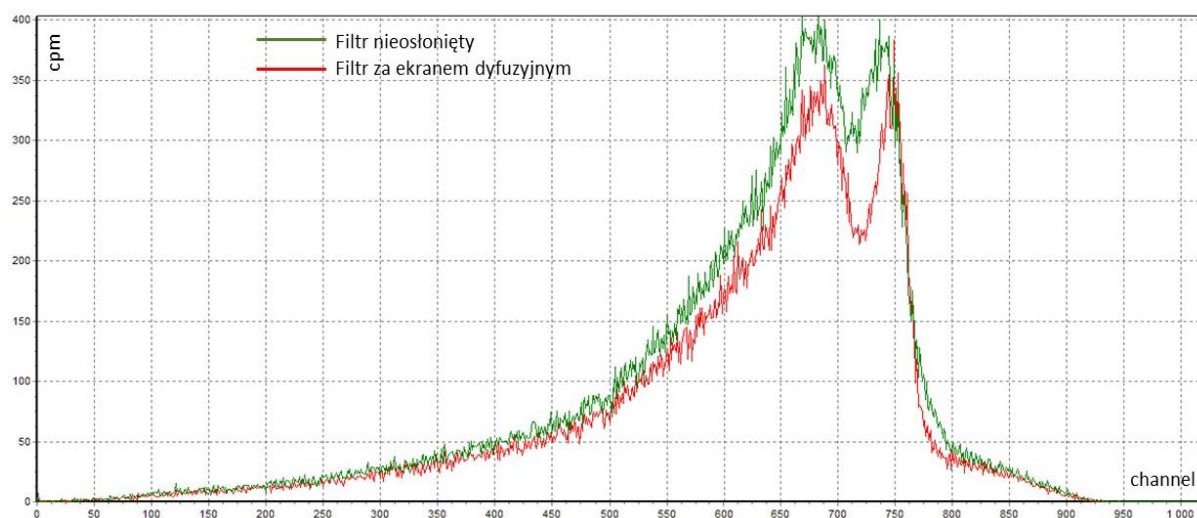
Frakcja wolna to niewielkie obiekty o rozmiarach do około 10 nm, co przekłada się na ich stosunkowo dużą ruchliwość i wysoki współczynnik dyfuzji. W rezultacie takie cząstki są w większym stopniu przechwytywane przez różne przedmioty i elementy filtrujące (plate-out), w tym wloty urządzeń pomiarowych. Przed przystąpieniem do właściwych kalibracji sprawdzono zatem jaki jest udział frakcji wolnej w komorze. W tym celu w komorze umieszczono dwa odrębne filtry, na których zbierane były pochodne. Jeden z nich był filtrem otwartym, a strumień powietrza przepływał bezpośrednio przez ten filtr. Z kolei do drugiego filtra powietrze docierało dopiero po uprzednim przejściu przez ekran dyfuzyjny, którego rolą jest zatrzymanie frakcji wolnej. Ekran dyfuzyjny był wykonany w postaci metalowej siatki, w której średnica włókna wynosiła 30  $\mu\text{m}$ , a gęstość upakowania elementów filtrujących 0,282. Natężenie przepływu powietrza przez oba filtry było kontrolowane za pomocą przepływomierzy. Powietrze było przepompowywane przez filtr przez 10 minut. Następnie filtry zostały umieszczone w oddzielnych fiolkach z ciekłym scyntylatorem i umieszczone w spektrometrach ciekłoscyn-

tylacyjnych (dwóch równolegle), celem oznaczenia stężenia energii potencjalnej alfa krótkoży-  
ciowych produktów rozpadu radonu. Pomiar aktywności nuklidów zgromadzonych na filtrach  
w spektrometrze były prowadzone w czasie 2 – 5 min, 6 – 20 min i 21 – 30 min licząc od  
momentu zakończenia pompowania powietrza przez filtr. Pomiar powtórzono trzykrotnie,  
a udział frakcji wolnej wynosił od 0,03 do 0,06 (tabela 13).

Tabela 13. Udział frakcji wolnej w komorze radonowej

Pomiar	PAEC [ $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ]		$f_p$
	Filtr nieosłonięty	Filtr za ekranem	
1.	$13,09 \pm 0,48$	$12,76 \pm 0,56$	0,03
2.	$10,89 \pm 0,41$	$11,34 \pm 0,41$	0,04
3.	$12,66 \pm 0,47$	$13,41 \pm 0,50$	0,06

Rys. 14 ilustruje widmo promieniowania otrzymane podczas jednego z pomiarów udziału frak-  
cji wolnej. Na podstawie pomiarów aktywności nuklidów zgromadzonych na filtrze nieosło-  
nionym oraz filtrze znajdującym się za ekranem dyfuzyjnym, obliczono stężenie energii poten-  
cjalnej alfa pochodnych radonu (PAEC) i udział frakcji wolnej.

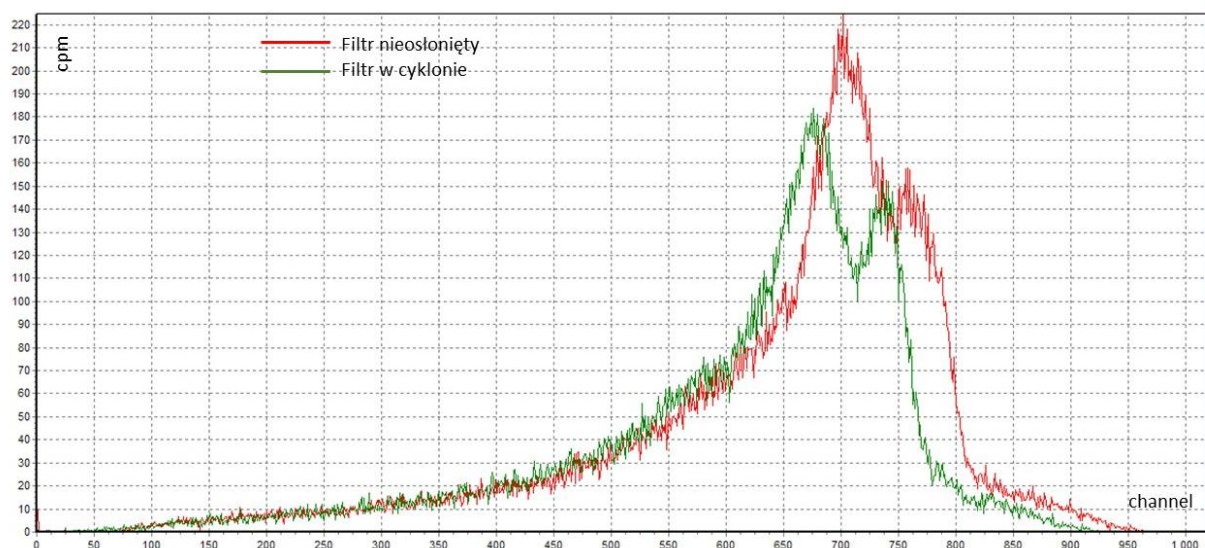


Rys. 14. Widma otrzymane w trakcie jednoczesnego pomiaru produktów rozpadu radonu zebranych na filtrze  
nieosłoniętym oraz na filtrze za ekranem dyfuzyjnym

## 6.5. Zakłócenia wprowadzane przez cyklon

Rutynowo mierniki ALFA wykorzystywane są do pomiaru produktów rozpadu radonu  
w kopalniach. Pierwotnie metoda pomiaru PAEC została zaadaptowana do urządzeń wykorzy-  
stywanych w kopalniach do pomiaru zapylenia. Miernik została skonstruowany tak, aby swym

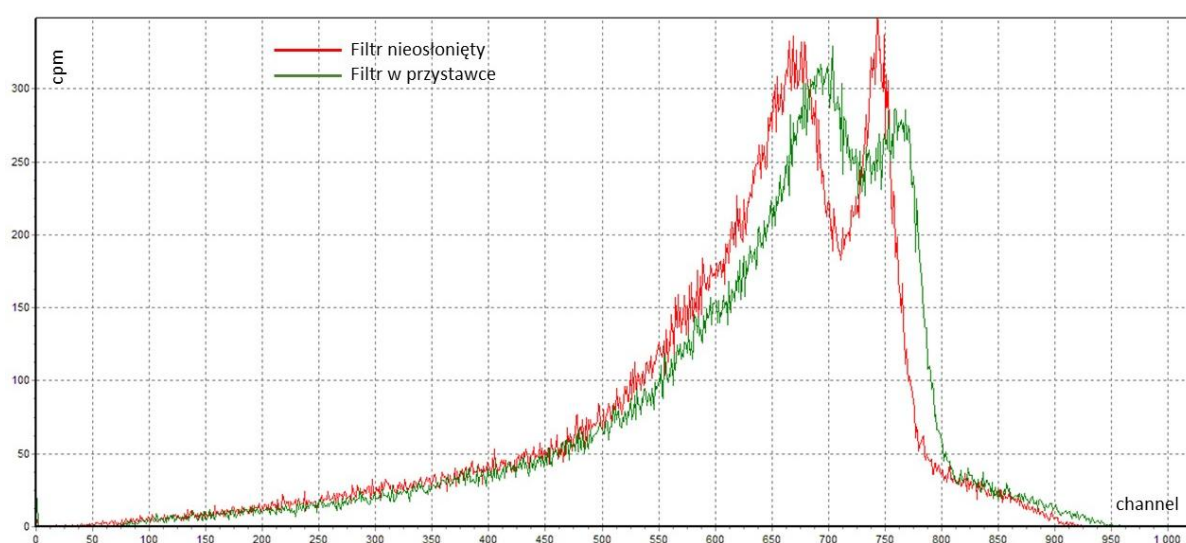
kształtem pasował do mikrocyklonów stosowanych w pyłomierzach. Podczas pomiarów prowadzonych w kopalniach, miernik umieszczany jest w mikrocyklonie i wówczas rozpoczyna się przepompowywanie powietrza przez filtr. Ponieważ rolą mikrocyklonu jest odseparowanie frakcji o rozmiarach większych niż respirabilna ( $>10 \mu\text{m}$ ), postanowiono sprawdzić, jaka część produktów rozpadu radonu nie osiąga filtra w wyniku zastosowania tego układu. W tym celu równocześnie przeprowadzono dwa pomiary. Pierwszy tor pomiarowy składał się z nieekranowanego filtra, przez który pompowano powietrze, a drugi z filtra umieszczonego w mikrocyklonie. Były to filtry tego samego rodzaju. Natężenie przepływu było stale kontrolowane, a czas pobierania próbki wynosił 10 min. Następnie, jak we wcześniejszym przypadku, filtry zostały umieszczone we fiolkach z ciekłym scyntylatorem, a aktywności zebranych nuklidów zostały zmierzone w liczniku ciekłoscyntylacyjnym. Zastosowano ten sam schemat czasowy, co we wcześniejszych testach: 2 – 5, 6 – 20 i 21 – 30 min po zakończeniu pompowania. Poniżej przedstawiono uzyskane widma (rys. 15).



Rys. 15. Widma otrzymane w trakcie jednoczesnego pomiaru produktów rozpadu radonu zebranych na filtrze nieosłoniętym oraz na filtrze umieszczonym w cyklonie

Obliczone stężenie energii potencjalnej alfa wynosiło  $21,33 \pm 1,85 \mu\text{J}/\text{m}^3$  i  $24,71 \pm 2,04 \mu\text{J}/\text{m}^3$  odpowiednio dla filtra w cyklonie i filtra, do którego strumień powietrza docierał bezpośrednio. Oznacza to, że w przypadku warunków laboratoryjnych mikrocyklon może redukować sygnał o około 14%, co w jakimś stopniu mogło być spowodowane również występowaniem frakcji wolnej. Dalsze eksperymenty prowadzono wyłącznie z użyciem miernika umieszczonego w specjalnym uchwycie zapewniającym, że powietrze docierało bezpośrednio do filtra. Spraw-

dzono również, czy sam miernik może powodować obniżanie sygnału. Sprawdzenie przebiegało podobnie jak w poprzednich przypadkach. Pierwszy tor pomiarowy składał się z nieosłoniętego filtra, a drugi z filtra znajdującego się w mierniku alfa. Pompowanie powietrza przez filtry odbywało się równocześnie i trwało 10 minut. Zastosowano ten sam reżim czasowy pomiaru co w poprzednich przypadkach. Rys. 16 przedstawia otrzymane widma. Obliczone PAEC wynosiło  $10,85 \pm 0,41 \mu\text{J}/\text{m}^3$  w przypadku filtra nieosłoniętego i  $10,51 \pm 0,40 \mu\text{J}/\text{m}^3$  w przypadku filtra umieszczonego w mierniku. Różnice między powyższymi wynikami mieszczą się w granicach wyznaczonych niepewności. Przyjmuje się zatem, że sam miernik alfa nie wprowadza żadnych zakłóceń w pomiarze.



Rys. 16. Widma otrzymane w trakcie jednoczesnego pomiaru produktów rozpadu radonu zebranych na filtrze nieosłoniętym oraz na filtrze umieszczonym w mierniku alfa

## 6.6. Wyniki kalibracji

Jak opisano we wcześniejszych punktach w celu wytworzenia w komorze odpowiedniej atmosfery zastosowano przepływowe źródło radu i roztwór chlorku toru. Stosowano dwa tory pomiarowe. Pierwszy to tor kalibrowanego urządzenia, a drugi to filtr przeznaczony do pomiaru referencyjnego stężenia energii potencjalnej alfa. Natężenie przepływu w obydwóch urządzeniach wynosiło około 2 l/min. Filtry znajdowały się w specjalnych uchwytych, a regulowany przepływ powietrza był wymuszany przez aspiratory tego samego typu. W przypadku urządzenia kalibrowanego pobór próby powietrza trwał jedną godzinę, a w przypadku metody referencyjnej dwukrotnie przez 0,5 godziny dla pomiarów w atmosferze radonowej i jeden jednogodzinny pomiar w atmosferze toronowej. Sekwencje pomiarowe aktywności filtrów w metodzie referencyjnej zostały przedstawione w tabeli 12.

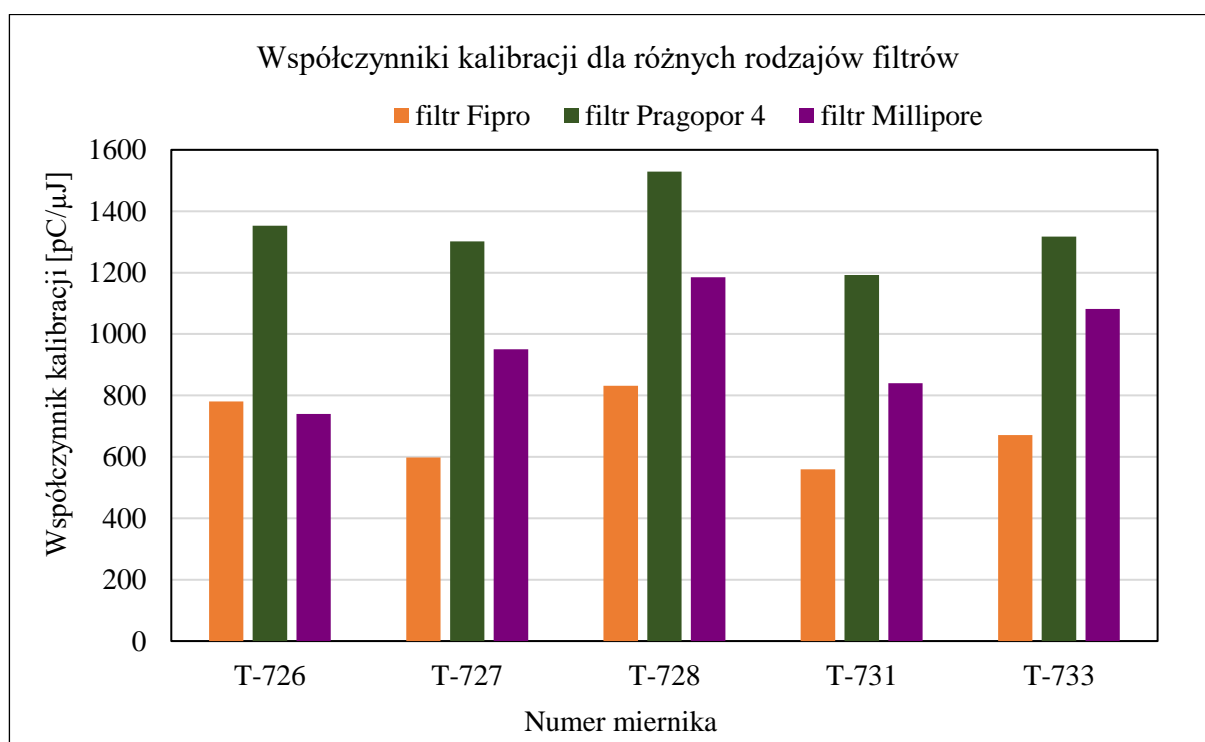
W tabeli 14 przedstawiono otrzymane współczynniki kalibracji dla poszczególnych mierników alfa produktów rozpadu radonu, a w tabeli 15 dla produktów rozpadu toronu. W kolumnie pierwszej zawarto numer identyfikacyjny miernika, kolumna druga to wyznaczona wartość referencyjna stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu, a w kolejnych kolumnach ujęto wartości wyznaczonych współczynników kalibracji dla poszczególnych głowic pomiarowych w mierniku alfa. Wykonano również pomiary współczynników kalibracji, w odniesieniu do promieniowania gamma (tabela 17).

Tabela 14. Wyznaczone współczynniki kalibracji detektorów dla produktów rozpadu radonu

Numer miernika	Wartość referencyjna PAEC [ $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ]	Współczynnik kalibracji $k_i$ detektora w i-tej głowicy w mierniku [ $\text{pC}/\mu\text{J}$ ]		
		i=1	i=2	i=3
<b>Filtr polipropylenowy Fipro</b>				
T-725	$21,38 \pm 1,67$	$651 \pm 83$	$624 \pm 79$	$508 \pm 65$
T-726	$38,83 \pm 1,92$	$814 \pm 59$	$779 \pm 56$	$748 \pm 54$
T-727	$38,84 \pm 1,92$	$792 \pm 57$	$367 \pm 27$	$635 \pm 46$
T-728	$37,73 \pm 1,88$	$753 \pm 55$	$973 \pm 71$	$768 \pm 57$
T-729	$16,61 \pm 1,26$	$746 \pm 94$	$848 \pm 107$	$380 \pm 48$
T-730	$18,91 \pm 1,51$	$529 \pm 68$	$238 \pm 31$	$755 \pm 97$
T-731	$37,38 \pm 1,87$	$422 \pm 31$	$803 \pm 102$	$714 \pm 91$
T-732	$15,14 \pm 1,25$	$426 \pm 54$	$803 \pm 102$	$714 \pm 91$
T-733	$32,19 \pm 1,65$	$647 \pm 48$	$608 \pm 45$	$757 \pm 56$
T-734	$15,74 \pm 1,33$	$1034 \pm 135$	$745 \pm 97$	$552 \pm 72$
T-416	$22,35 \pm 1,67$	$548 \pm 68$	$542 \pm 68$	$715 \pm 89$
T-417	$12,49 \pm 1,02$	$861 \pm 112$	$614 \pm 80$	$699 \pm 91$
T-418	$18,26 \pm 1,40$	$744 \pm 94$	$697 \pm 88$	$679 \pm 86$
T-419	$10,99 \pm 0,90$	$861 \pm 111$	$800 \pm 103$	$805 \pm 104$
<b>Filtr celulozowy Pragopor 4</b>				
T-726	$19,24 \pm 1,07$	$1374 \pm 105$	$1299 \pm 99$	$1384 \pm 106$
T-727	$17,85 \pm 1,02$	$1499 \pm 116$	$883 \pm 69$	$1524 \pm 118$
T-728	$20,09 \pm 1,12$	$1480 \pm 113$	$1536 \pm 118$	$1573 \pm 121$
T-731	$22,11 \pm 1,64$	$849 \pm 105$	$1253 \pm 156$	$1475 \pm 184$
T-733	$20,45 \pm 1,12$	$1495 \pm 114$	$1181 \pm 90$	$1277 \pm 97$
<b>Filtr poliwęglanowy Millipore</b>				
T-726	$24,75 \pm 1,91$	$751 \pm 95$	$739 \pm 93$	$729 \pm 92$
T-727	$27,45 \pm 1,99$	$994 \pm 123$	$731 \pm 90$	$1126 \pm 139$
T-728	$34,21 \pm 2,47$	$1163 \pm 143$	$1336 \pm 165$	$1056 \pm 130$
T-731	$34,28 \pm 2,46$	$693 \pm 85$	$883 \pm 109$	$943 \pm 116$
T-733	$32,36 \pm 2,35$	$1127 \pm 139$	$922 \pm 114$	$1195 \pm 148$



Jak wynika z tabeli 14 wyznaczono współczynniki kalibracyjne dla różnych typów filtrów. Zastosowane filtry to polipropylenowy filtr Fipro, celulozowy filtr Pragopor 4 i poliwęglanowy filtr Millipore. Filtry Fipro wytwarzane są z bardzo cienkich włókien polipropylenowych (1 – 5  $\mu\text{m}$ ) i charakteryzuje je wysoka skuteczność oraz duża stabilność masy przy zmianach wilgotności względnej powietrza. Filtry Pragopor 4 wykonane są z nitrocelulozy o porowatości 0,85  $\mu\text{m}$  i prawie 100% wydajności przechwytywania. Natomiast Millipore to filtry wykonane z poliwęglanów zawierających przelotowe otwory o średnicy 0,8  $\mu\text{m}$ . Na rys. 17 przedstawiono otrzymane wyniki. Jak widać, najwyższą wydajność zbierania pochodnych na filtrze uzyskano dla filtra Pragopor 4. Wydaje się zatem, że filtr ten najlepiej nadaje się do stosowania w mierniku alfa. Z uwagi jednak na warunki atmosferyczne panujące w kopalniach (m.in. bardzo wysoka wilgotność), filtr Fipro może być lepszym rozwiązaniem, gdyż jest o wiele bardziej odporny na wymagające warunki środowiska. Słabszą wydajność zbierania pochodnych podczas pomiaru dla tego filtra można zniwelować przez przeprowadzenie odpowiedniej kalibracji. Tzn. w kalibrowanym mierniku alfa umieszcza się filtr Fipro, a do pomiaru referencyjnego stosuje się filtr Pragopor, wówczas wyznaczony współczynnik kalibracji będzie uwzględniał słabszą wydajność zbierania promieniotwórczych aerozoli na filtrze Fipro.



Rys. 17. Wyznaczone współczynniki kalibracyjne stosowanych mierników dla różnych materiałów filtracyjnych

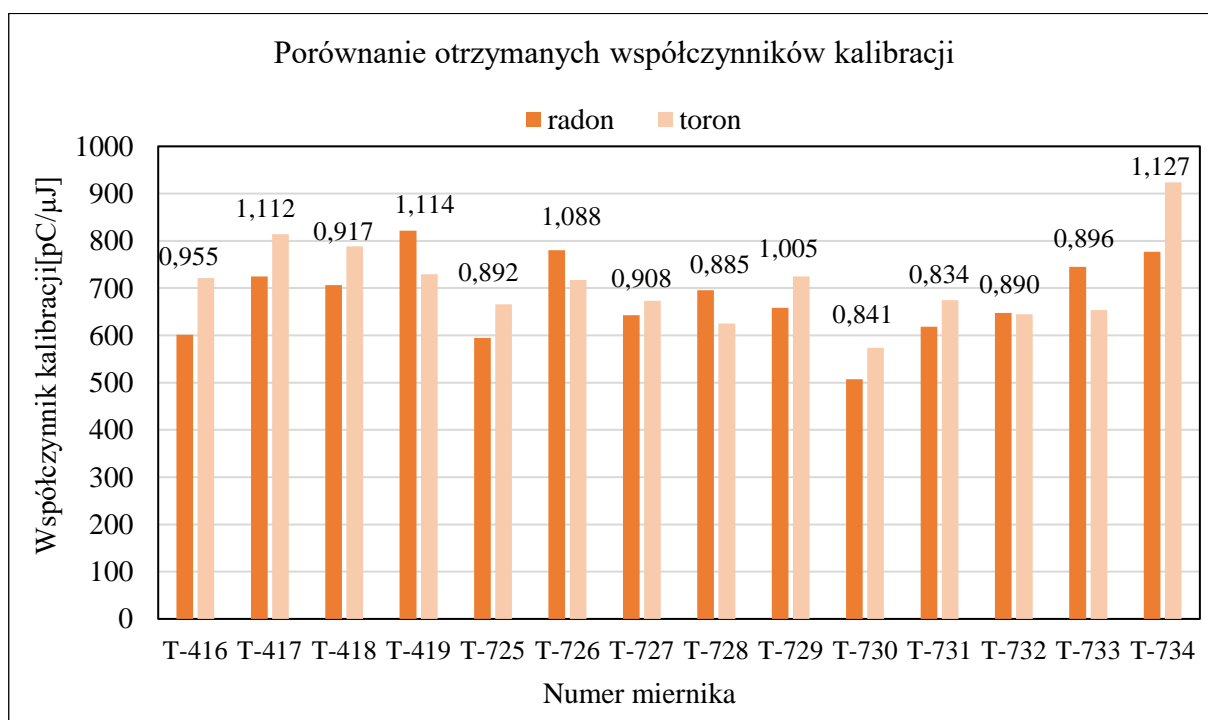
Tabela 15. Wyznaczone współczynniki kalibracji detektorów dla produktów rozpadu toronu

Numer miernika	Wartość referencyjna PAEC [ $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ]	Współczynnik kalibracji $k_i$ detektora w i-tej głowicy w mierniku alfa [ $\text{pC}/\mu\text{J}$ ]		
		i=1	i=2	i=3
Filtr Fipro				
T-725	$28,52 \pm 2,51$	$758 \pm 101$	$687 \pm 92$	$552 \pm 74$
T-726	$53,59 \pm 4,94$	$831 \pm 113$	$553 \pm 75$	$768 \pm 104$
T-727	$44,08 \pm 4,06$	$678 \pm 93$	$486 \pm 66$	$856 \pm 117$
T-728	$54,44 \pm 5,55$	$621 \pm 85$	$712 \pm 98$	$543 \pm 74$
T-729	$40,62 \pm 3,55$	$819 \pm 109$	$1002 \pm 133$	$354 \pm 47$
T-730	$13,22 \pm 1,28$	$641 \pm 89$	$150 \pm 21$	$929 \pm 129$
T-731	$52,81 \pm 4,88$	$383 \pm 52$	$782 \pm 106$	$860 \pm 117$
T-732	$30,56 \pm 2,68$	$453 \pm 60$	$762 \pm 101$	$719 \pm 96$
T-733	$53,16 \pm 4,92$	$969 \pm 132$	$855 \pm 116$	$1004 \pm 137$
T-734	$32,25 \pm 2,81$	$1242 \pm 165$	$963 \pm 128$	$565 \pm 75$
T-416	$42,71 \pm 3,74$	$562 \pm 75$	$587 \pm 78$	$1015 \pm 135$
T-417	$53,21 \pm 4,92$	$1153 \pm 157$	$707 \pm 96$	$583 \pm 79$
T-418	$34,81 \pm 3,02$	$878 \pm 116$	$763 \pm 101$	$725 \pm 96$
T-419	$42,18 \pm 3,68$	$669 \pm 89$	$799 \pm 106$	$720 \pm 96$

Z tabeli 14 i 15 wynika, że współczynniki kalibracji mierników dla produktów rozpadu radonu i toronu (dla wybranego rodzaju filtra) nie różnią się znacząco. W celu zweryfikowania hipotezy o równości tych współczynników wykonano test Wilcoxona. Jest to nieparametryczny test dla par obserwacji, stosowany w przypadku dwóch równolicznych prób. Test ten nie posiada założeń dotyczących rozkładu prób. Hipoteza zerowa brzmi: nie ma istotnej różnicy w rozkładach zmiennych. Wyliczenie statystyki Wilcoxona polega na wyznaczeniu różnic między parami, uporządkowaniu wartości bezwzględnych i nadaniu im rang. Następnie sumuje się rangi dla różnic ujemnych i dla różnic dodatnich. Statystykę T testu Wilcoxona pełni mniejsza suma rang. W przypadku analizowanych danych, jest to suma rang dodatnich i wynosi 35. Wartość krytyczna T testu Wilcoxona dla 14 prób i poziomu istotności 0,05 wynosi 21. Nie istnieje zatem podstawa do odrzucenia hipotezy zerowej. Różnica między współczynnikami kalibracyjnymi wyznaczonymi w atmosferze radonowej i toronowej jest nieistotna statystycznie. W tabeli 16 zebrano średnie wartości współczynników kalibracji w atmosferze radonowej i toronowej oraz ich stosunki. Ponieważ test Wilcoxona wskazuje na brak istotnych różnic między wynikami, proces kalibracji mierników można uprościć do prowadzenia procedury tylko w atmosferze radonowej. Wyniki tej analizy w formie graficznej przedstawiono na rys. 18.

Tabela 16. Porównanie wartości współczynników kalibracyjnych otrzymanych w atmosferze radonowej i toronowej

Numer miernika	Średni współczynnik kalibracji (radon) $k_R$ [pC/ $\mu$ J]	Średni współczynnik kalibracji (toron) $k_T$ [pC/ $\mu$ J]	Stosunek $k_R/k_T$
T-725	594	666	0,892
T-726	781	717	1,088
T-727	643	673	0,955
T-728	696	625	1,113
T-729	658	725	0,908
T-730	507	573	0,885
T-731	619	675	0,917
T-732	648	644	1,005
T-733	745	654	1,140
T-734	777	924	0,841
T-416	601	721	0,834
T-417	725	814	0,890
T-418	706	789	0,896
T-419	822	729	1,127



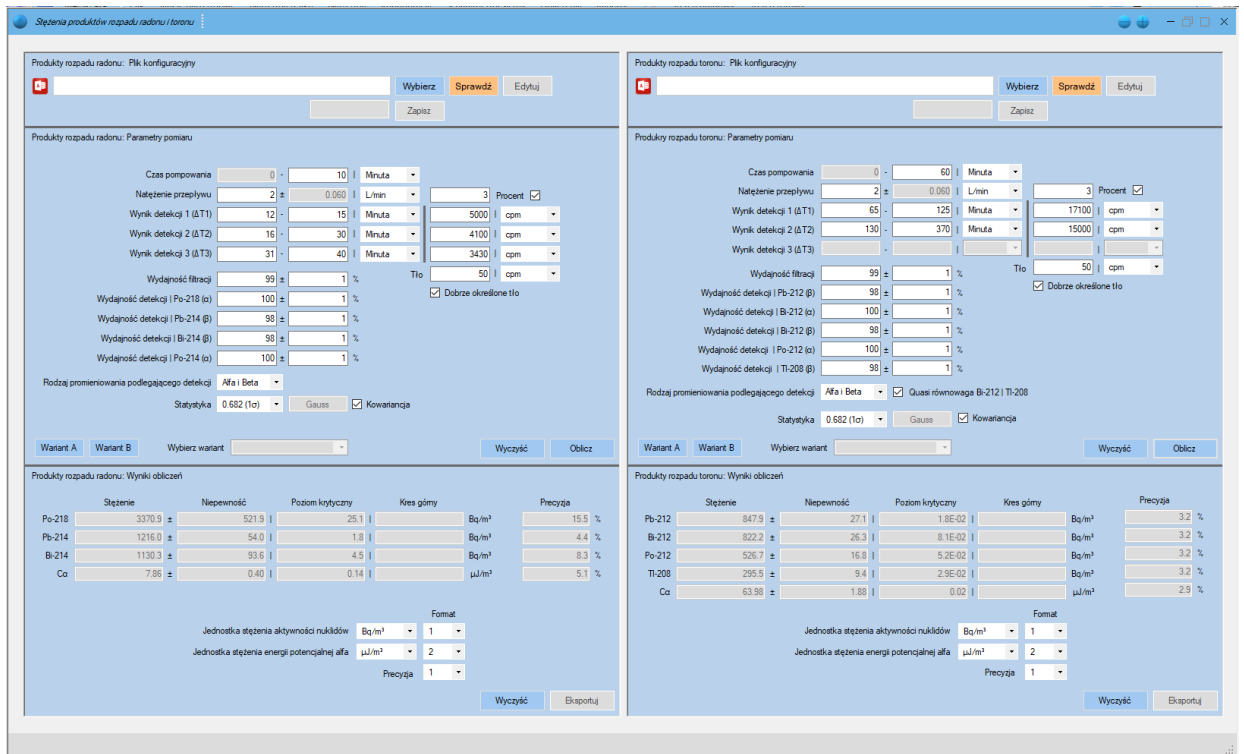
Rys. 18. Porównanie współczynników kalibracji mierników otrzymanych w atmosferze radonowej i toronowej

Tabela 17. Wyznaczone współczynniki kalibracji detektorów dla promieniowania gamma

Numer miernika	Kerma K [μGy]	Współczynnik kalibracji $\gamma_{Ai}$ detektora położonego bliżej filtra w i-tej głowicy [pC/μGy]			Współczynnik kalibracji $\gamma_{Ti}$ detektora położonego dalej filtra w i-tej głowicy [pC/μGy]		
		i=1	i=2	i=3	i=1	i=2	i=3
T-725	3742 ± 141	1,24 ± 0,06	2,52 ± 0,11	2,76 ± 0,12	2,75 ± 0,12	3,42 ± 0,15	3,31 ± 0,15
T-726	3742 ± 141	2,47 ± 0,11	3,10 ± 0,14	1,96 ± 0,09	3,05 ± 0,13	3,32 ± 0,14	3,19 ± 0,14
T-727	3742 ± 141	2,42 ± 0,11	2,71 ± 0,12	3,01 ± 0,13	2,76 ± 0,12	3,31 ± 0,15	3,19 ± 0,14
T-728	3742 ± 141	2,37 ± 0,11	2,64 ± 0,12	1,60 ± 0,07	3,48 ± 0,15	2,95 ± 0,13	3,51 ± 0,15
T-729	3742 ± 141	2,18 ± 0,08	1,82 ± 0,08	2,78 ± 0,12	2,92 ± 0,13	2,67 ± 0,12	3,00 ± 0,13
T-730	3742 ± 141	2,68 ± 0,12	2,06 ± 0,09	2,18 ± 0,10	2,79 ± 0,12	2,44 ± 0,11	2,51 ± 0,11
T-731	3742 ± 141	2,15 ± 0,09	2,28 ± 0,10	2,24 ± 0,10	2,55 ± 0,11	3,11 ± 0,14	2,67 ± 0,12
T-732	3742 ± 141	2,70 ± 0,12	3,10 ± 0,14	2,54 ± 0,11	3,05 ± 0,13	2,85 ± 0,12	3,09 ± 0,13
T-733	3742 ± 141	2,74 ± 0,12	2,43 ± 0,11	2,38 ± 0,11	2,85 ± 0,13	3,06 ± 0,13	2,98 ± 0,13
T-734	3742 ± 141	2,70 ± 0,12	3,16 ± 0,14	2,65 ± 0,12	2,99 ± 0,13	3,32 ± 0,15	3,12 ± 0,14
T-416	3742 ± 141	1,12 ± 0,05	0,83 ± 0,04	1,48 ± 0,07	1,18 ± 0,05	0,93 ± 0,04	1,88 ± 0,08
T-417	3742 ± 141	1,32 ± 0,06	1,41 ± 0,06	1,64 ± 0,07	1,01 ± 0,05	1,27 ± 0,06	1,12 ± 0,05
T-418	3742 ± 141	1,65 ± 0,07	1,48 ± 0,07	1,31 ± 0,06	1,25 ± 0,06	1,93 ± 0,06	1,16 ± 0,05
T-419	3742 ± 141	1,40 ± 0,06	1,54 ± 0,07	1,46 ± 0,07	1,62 ± 0,07	1,52 ± 0,07	1,94 ± 0,06

## 6.7. Obliczenia

Ze względu na znaczną komplikację obliczenia zostały zrealizowane za pomocą aplikacji Harshaw (Visual Basic) wykonanej dla potrzeb Śląskiego Centrum Radiometrii Środowiskowej Głównego Instytutu Górnictwa (rys. 19). Program został przetestowany za pomocą programów Mathematica (Wolfram Research Inc., 100 Trade Center Drive, Champaign, IL USA) oraz Excel (Microsoft, Redmond, USA).



Rys. 19. Zrzut ekranu programu Harshaw

## 7. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa i ocena dawki skutecznej

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu in situ. Pomiary prowadzono w Zabytkowej Kopalni Srebra w Tarnowskich Górach, Kopalni Doświadczalnej Barbara GIG-PIB, w muzeum domu Nerona w Rzymie oraz w Termach Dioklecjana w Rzymie. Główną przesłanką do wyboru miejsc wykonania pomiarów był fakt, że obiekty te charakteryzują się podwyższoną promieniotwórczością naturalną. Obecność radonu i toronu, a co za tym idzie ich pochodnych w badanych obiektach związana jest z obecnością w skorupie ziemskiej uranu  $^{238}\text{U}$  i toru  $^{232}\text{Th}$ , które są protoplastami naturalnych szeregów promieniotwórczych. W zależności od rodzaju skały, stężenie tych dwóch izotopów promieniotwórczych może być różne. Wyższe stężenia uranu występują zazwyczaj w skałach granitowych czy magmowych, podczas gdy wyższe stężenia toru obserwuje się w tufie wulkanicznym. Radon/toron powstały w wyniku sukcesywnego rozpadu promieniotwórczego uranu czy toru, uwalnia się do przestrzeni porowej skał i gleby w procesie zwanym emanacją. Prowadzenie prac związanych z wydobywaniem kopalni sprawia, że radon może z większą swobodą i ze stosunkowo dużych powierzchni migrować ze skał do wyrobisk górniczych, co w połączeniu z różnymi warunkami wentylacyjnymi zwiększa narażenie osób pracujących w kopalniach czynnych lub turystycznych. W wyrobiskach górniczych kopalń podziemnych stężenia radonu i krótkożyciowych produktów jego rozpadu bywają większe niż gdzie indziej, gdyż jest to przestrzeń z ograniczoną wentylacją, otoczona skałami, często mocno spękany. Taka sytuacja ma miejsce w dwóch badanych obiektach, w Zabytkowej Kopalni Srebra oraz w Kopalni Doświadczalnej Barbara. W przypadku obiektów zlokalizowanych w Rzymie, głównym źródłem toronu jest materiał budowlany zwany cegłą tufową, który charakteryzuje się wysoką zawartością toru w swym składzie. W przypadku domów, radon obecny w skałach i glebie otaczających budynek przedostaje się do wnętrza przez naturalne nieszczelności w podłogach w piwnicach, przestrzenie między elementami konstrukcyjnymi, spękania w fundamentach, oraz różnego rodzaju przepusty. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu, obliczono dawki skuteczne jakie mogliby otrzymywać pracownicy oraz zaproponowano działania, jakie można podjąć w celu zmniejszenia narażenia na produkty rozpadu radonu i toronu.

## 7.1. Zabytkowa Kopalnia Srebra w Tarnowskich Górach

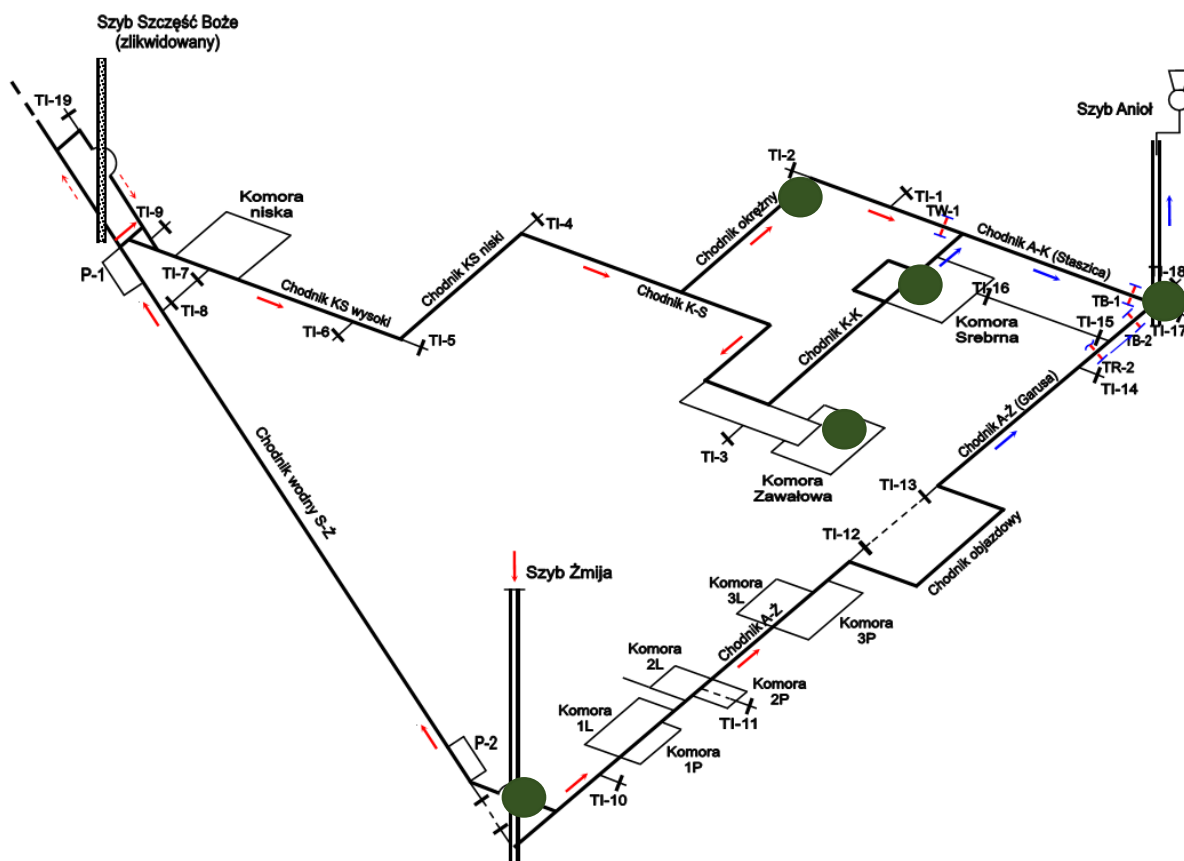
Zabytkowa Kopalnia Srebra jest położona w granicach miasta Tarnowskie Góry. Eksploatację złóż w tym rejonie zakończono w 1912 roku, a od 1976 roku część dawnych wyrobisk została udostępniona do zwiedzania. Podczas funkcjonowania kopalni Fryderyk, od 1784 r. powstało 150 km wyrobisk i około 20000 szybów i szybików. Przeważająca część dawnych wyrobisk kopalni została odizolowana, a pozostałą część przeznaczono na cele turystyczne. Obecna trasa udostępniona zwiedzającym obejmuje chodniki o długości 1740 m w rejonie 3 szybów kopalnianych Anioł, Żmija i Szczęść Boże, przy czym szyb Szczęść Boże został zasypany i nie pełni żadnej funkcji technicznej. Kopalnia usytuowana jest na głębokości 40 m. Czas zwiedzania kopalni wynosi około 1 godziny. W udostępnionej części kopalni panuje specyficzny mikroklimat, charakteryzujący się dość stałą temperaturą wynoszącą około 10 °C przez cały rok i wilgotnością względną około 90%.

Minerały kruszcowe na obszarze, na którym położona jest Zabytkowa Kopalnia Srebra w Tarnowskich Górach występowały w węglanowych osadach triasu, wchodzących w skład permsko-mezozoicznej pokrywy platformowej. Tworzy ona tzw. monoklinę śląsko-krakowską, zalegającą na starszych utworach paleozoiku (karbon i dewon). Podłoże pokrywy platformowej stanowi prekambryjski blok górnośląski, zbudowany ze skał krystalicznych w postaci granitoidów, gnejsów, łupków krystalicznych i zasadowych skał magmowych. Trias w rejonie górnośląskim jest w pełni wykształcony. Okruszcowanie złożeń związane jest z serią tzw. dolomitów kruszczośnych, charakteryzujących się pionową i poziomą zmiennością wykształcenia. W tych skałach wykonano wyrobiska wchodzące obecnie w skład podziemnej trasy turystycznej. Stratygraficznie odpowiadają one wczesnemu i środkowemu triasowi, a ich wiek wynosi 235-252 mln lat. Przyjmuje się, że są to utwory epigenetyczne, powstałe wskutek dolomityzacji wtórnej, zachodzącej po zestaleniu się osadów. Pod względem strukturalnym są to skały od krystalicznych do zbitych, na ogół jamiste i spękane, przeważnie grubo lub średnioławicowe, przewarstwione warstewkami słabo związłego dolomitu lub iłu. W rejonie kopalni zalegają one stosunkowo płytko, 20-50 m od powierzchni. Na skutek zjawisk tektonicznych kompleks uległ silnemu spękaniu (gęsta sieć spękań i szczelin). Ze zjawiskami tektonicznymi związane są późniejsze procesy krasowe. Głównym minerałem kruszcowym w omawianym rejonie była galena (PbS), z uwagi na wysoką zawartość srebra (max. do 1,2%) zwana galeną srebronośną. Złożeń galeny lokowały się przeważnie w spągowej części dolomitów kruszczośnych, a ruda występowała w postaci żył i żyłopodobnych ławic. Ponadto w złożu sporadycznie występowały mi-

nerały cynku w postaci sfalerytu i wurcytu. Mineralem charakterystycznym dla rejonu Tarnowskich Gór jest tarnowicyt  $(Ca, Pb)CO_3$ . Mineralogicznie jest to aragonit  $CaCO_3$  z izomorficzną domieszką cerusytu  $PbCO_3$  (do 9%). Występował on w postaci promienistych skupień krystalicznych na powierzchni dolomitu i galeny. Przyjmuje się, że omawiane złoża są pochodzenia hydrotermalnego, związanego z zasadowo-alkalicznymi utworami pomagmowymi neogenu. Nadkład złoża stanowią polodowcowe utwory czwartorzędu o miąższości dochodzącej do 30 m, reprezentowane przez piaski, gliny i żwiry plejstoceńskie oraz piaski i muły holocenu. Utwory czwartorzędowe zalegają na silnie zróżnicowanej morfologicznie powierzchni triasu (Guzik i Piechulska, 1968, Stupnicka, 2007, Dzięgiel, 2008).

Wentylacja kopalni odbywa się w dwojaki sposób. W czasie przerwy w ruchu turystycznym trasa przewietrzana jest za pomocą depresji naturalnej w kierunku od szybu Źmija do szybu Anioł. W czasie, kiedy jest udostępniona dla ruchu turystycznego podziemna trasa przewietrzana jest w sposób mechaniczny. W szybie Anioł zamontowany jest wentylator ssący, którego zadaniem jest odprowadzenie powietrza. Wentylator ten zapewnia przepływ powietrza w wyrobiskach trasy podziemnej w ilości co najmniej  $120 \text{ m}^3/\text{min}$ . W celu szybkiej skutecznej wymiany powietrza w wyrobiskach każdorazowo po rozpoczęciu ruchu turystycznego przez około 1,5 h podziemna trasa jest dodatkowo przewietrzana wentylacją tłoczącą (w kierunku od szybu Źmija do szybu Anioł) za pomocą jednego z dwóch wentylatorów zabudowanych na stacji wentylacyjnej przy szybie Źmija. Schemat turystycznej części kopalni przedstawiono na rysunku poniżej (rys. 20). Strzałkami zaznaczono na rysunku kierunek przepływu powietrza, przy czym kolor czerwony oznacza świeże powietrze, a kolor niebieski powietrze zużyte.





Rys. 20. Schemat sieci wentylacyjnej w Zabytkowej Kopalni Srebra z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

W zabytkowej Kopalni Srebra w Tarnowskich Górach przeprowadzono kampanię pomiarową stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Na rys. 20 zaznaczono punkty, w których prowadzono pomiary. Stężenie PAEC zmierzono w rejonie szybu wdechowego Żmija, w rejonie szybu wydechowego Anioł, w komorze Zawałowej, w komorze Srebrnej oraz w chodniku Okrężnym. Pomiary prowadzono zgodnie ze schematem opisanym w rozdziale 5. Miernik z detektorami termoluminescencyjnymi umieszczany była nad filtrem w dedykowanym uchwycie, który połączony był z aspiratorem. W każdym przypadku czas próbkowania wynosił 12 h. Po tym czasie filtr pozostawiany był na kolejne 5 godzin w tymże mierniku, a następnie przekładany do drugiego miernika z nowym zestawem detektorów. Ponieważ wentylacja mechaniczna uruchamiana była tylko podczas prowadzenia ruchu turystycznego (9.00-15.00), to pomiary prowadzone były w zmiennych warunkach wentylacyjnych. Natężenie przepływu powietrza pompowanego przez filtr wynosiło 1,9 l/min. Podczas prowadzonych badań zmierzono także przepływy powietrza w rejonach, w których wykonano pomiary PAEC. Największy przepływ powietrza odnotowano w szybie wydechowym Anioł, gdzie dociera i odprowadzane jest na powierzchnię powietrze z całej kopalni (78 m<sup>3</sup>/min). W rejonie

szybu wdechowego Żmija natężenie przepływu powietrza wynosiło 77 m<sup>3</sup>/min, natomiast w chodniku okrężnym jedynie 9,4 m<sup>3</sup>/min. Zdecydowana większość strumienia powietrza wentylacyjnego płynie chodnikami, a tylko niewielka jego część wpływa w obręb komór, zatem komory są najslabiej wentylowane. W tabeli 18 przedstawiono wyniki pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu.

Tabela 18. Stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu

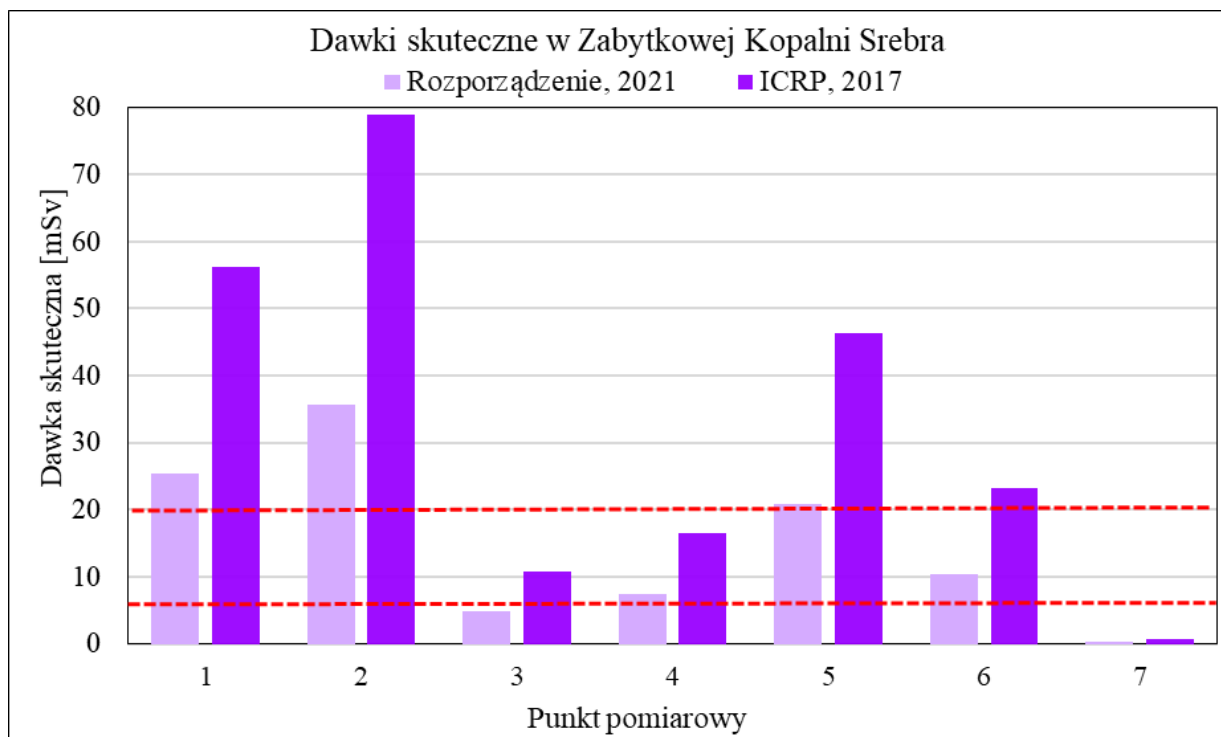
Lp.	Miejsce pomiaru	Czas próbkowania [h]	Stężenie energii potencjalne alfa produktów rozpadu [μJ/m <sup>3</sup> ]	
			radonu	toronu
1.	Komora zawałowa (przy spągu)	12	8,83 ± 1,29	0,18 ± 0,03
2.	Komora zawałowa (1,5 m nad spągciem)	12	12,38 ± 1,87	0,08 ± 0,02
3.	Szyb anioł (1,5 m nad spągciem)	12	1,64 ± 0,37	0,16 ± 0,06
4.	Komora srebrna (przy spągu)	12	2,63 ± 0,39	0,19 ± 0,04
5.	Komora srebrna (1,5 m nad spągciem)	12	7,33 ± 1,08	0,07 ± 0,02
6.	Chodnik okrężny (przy spągu)	12	3,54 ± 0,67	0,17 ± 0,04
7.	Szyb żmija (przy spągu)	12	0,19 ± 0,03	0,04 ± 0,02

Zmierzone stężenia energii potencjalne alfa wahały się od 0,19 do 12,38 μJ/m<sup>3</sup> dla produktów rozpadu radonu i 0,04-0,19 μJ/m<sup>3</sup> dla produktów rozpadu toronu. Najniższe stężenia zmierzono przy szybie Żmija, który jest szybem wdechowym, a najwyższe w komorze Zawałowej (12,38 μJ/m<sup>3</sup>), gdzie wymiana powietrza jest niewielka, a przestrzeń ta jest otoczona mocno spękanymi skałami. W tabeli 19 zestawiono wartości dawek skutecznych, przyjmując różne współczynniki konwersji. Dawki skuteczne zostały obliczone zgodnie z równaniem 3.1. Obliczeń dawek dokonano w oparciu o współczynniki konwersji dawki zawarte w rozporządzeniu Rady Ministrów, jak i rekomendowane przez ICRP (Rozporządzenie Rady Ministrów, 2021; ICRP, 2017). Czas pracy przyjęty do obliczeń wynosi 1800 h rocznie. Suma dawek od narażenia na pochodne radonu i toronu wynosiła 0,30-35,66 mSv (średnia 15,01 mSv) i 0,67-78,96 mSv (średnia 33,24 mSv) odpowiednio według wytycznych polskich i ICRP. W przypadku Zabytkowej Kopalni Srebra główny wkład do dawki pochodzi od produktów rozpadu radonu. Na rys. 21 porównano otrzymane dawki, poziomymi liniami zaznaczono limity dawek dla pracowników kategorii A i B narażenia radiacyjnego (6 i 20 mSv). Widać wyraźnie, że otrzymane wartości przekraczają dawkę 20 mSv, ustanowioną jako dawkę graniczną dla pracowników kategorii A. W takim przypadku należy podjąć działania zmierzające do ograniczenia narażenia

personelu. Działania takie można realizować poprzez ograniczenie czasu pracy, stosowanie środków ochrony indywidualnej, czy zwiększenie wydatku powietrza wentylacyjnego.

Tabela 19. Obliczone dawki skuteczne dla pracowników Zabytkowej Kopalni Srebra w Tarnowskich Górach (k-współczynniki konwersji w  $\text{mSv}/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})$ ,  $D_R$  i  $D_T$  dawki odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu)

Lp.	Miejsce pomiaru	Dawki skuteczne $D_R$ i $D_T$ [mSv]					
		(Rozporządzenie, 2021)			(ICRP, 2017)		
		$D_R$ (k=1,4)	$D_T$ (k=0,5)	$D_R + D_T$	$D_R$ (k=3,1)	$D_T$ (k=1,4)	$D_R + D_T$
1.	Komora zawałowa (przy spągu)	25,25	0,10	25,35	55,91	0,28	56,19
2.	Komora zawałowa (1,5 m nad spągiem)	35,66	0	35,66	78,96	0	78,96
3.	Szyb anioł (1,5 m nad spągiem)	4,81	0,11	4,92	10,66	0,15	10,81
4.	Komora srebrna (przy spągu)	7,36	0,12	7,48	16,29	0,17	16,46
5.	Komora srebrna (1,5 m nad spągiem)	20,94	0	20,94	46,37	0	46,37
6.	Chodnik okrężny (przy spągu)	10,36	0,10	10,46	22,93	0,28	23,21
7.	Szyb Żmija (przy spągu)	0,30	0	0,30	0,67	0	0,67



Rys. 21. Porównanie dawek obliczonych na podstawie różnych współczynników konwersji

## 7.2. Kopalnia Doświadczalna Barbara GIG-PIB

Kopalnia Doświadczalna Barbara (KD Barbara) jest placówką naukowo-badawczą Głównego Instytutu Górniczo-Państwowego Instytutu Badawczego w Katowicach. Kopalnia usytuowana jest w północno-wschodniej części Mikołowa na wzniesieniu pomiędzy centrum miasta, a dzielnicą Katowice Zarzecze i graniczy w niedalekiej odległości z obszarem i terenem górniczym Murcki oraz Łaziska II. KD Barbara znajduje się w południowym skrzydle siodła głównego na południe od uskoku Kłodnickiego. Budowa geologiczna złoża w tym obszarze to utwory czwartorzędu (piaski, żwiry i gliny) i karbonu produktywnego (warstwy łaziskie i orzeskie). Miąższość czwartorzędu w przeważającej części obszaru złoża wynosi 4 – 6 m miejscami w części południowej i północno-wschodniej strop karbonu występuje bezpośrednio pod warstwą gleby. Warstwy łaziskie wykształcone są w frakcji piaskowcowo-zlepieńcowej, gdzie tylko miejscami występują cienkie wkładki łupku ilastego. Utwory karbonu produktywnego stanowią głównie warstwy orzeskie, które wykształciły się z drobno i średnioziarnistych piaskowców, miejscami zlepieńcowatych i łupków ilastych, wśród których zalegają pokłady węgla kamiennego. Do najbardziej stałych pod względem rozprzestrzeniania i miąższości zaliczono pokłady 308, 310 i 318. Rejon kopalni dzieli na dwie części uskoki o kierunku WN-SE, o zrzućcie od 35 m do 50 m na SW, a w północno-zachodniej części złoża występuje uskoki o przebiegu

NW-SE i zrzucie od 20 m do 40 m. Skały otaczające pokłady węgla kamiennego tworzą górotwór o bardzo niejednorodnych cechach geologiczno-inżynierskich, spowodowanych spękaniami w skali makro i mikro, zmiennym wykształceniem litologicznym oraz naprzemianległym występowaniem ilowców, mułowców i piaskowców.

Wyrobiska korytarzowe KD Barbara zgrupowane są w dwóch poziomach udostępniania: 30 m i 46 m. Kopalnia posiada dwa szyby – główny (wdechowy) i wentylacyjny. Szyb główny o średnicy tarczy szybowej 5,1 m zgłębiony jest do głębokości 57 m i wykonany w obudowie betonowo murowej. Szyb Wentylacyjny zbudowany został w obudowie murowej o grubości 0,5 m i jest usytuowany w odległości około 160 m na zachód od szybu głównego i służy do odprowadzenia powietrza z obydwu poziomów. Głębokość tego szybu wynosi 40 m, a jego średnica to 3,5 m. Szyb wentylacyjny połączono ze stacją wentylatorów głównego przewietrzania, gdzie zainstalowano wentylatory typu WOK-1.8 o nominalnej wydajności 41,67 m<sup>3</sup>/s. Stacja wentylatorów wyposażona jest w urządzenia do regulacji wydajności i spiętrzania oraz zmiany kierunku przepływu powietrza, a jej regularna praca odbywa się w dni powszednie od 6.00 do 14.00. W wyrobiskach i grupie wyrobisk korytarzowych stanowiących połączenie między prądem powietrza prowadzonym od szybu wdechowego a odprowadzanym do szybu wdechowego zabudowane są tamy wentylacyjne. Wszystkie wyrobiska poziomu 30 m wykonane są w pokładzie węgla (310) i stanowią poligon doświadczalny dla potrzeb badawczych oraz pełnią funkcje wentylacyjne. Wyrobiska poziomu 46 m wykorzystywane są do prowadzonych eksperymentów badawczych oraz potrzeb systemu odwadniania kopalni. Na poziomie 30 m i 46 m regulacja prądów powietrza odbywa się za pomocą tam regulacyjnych.



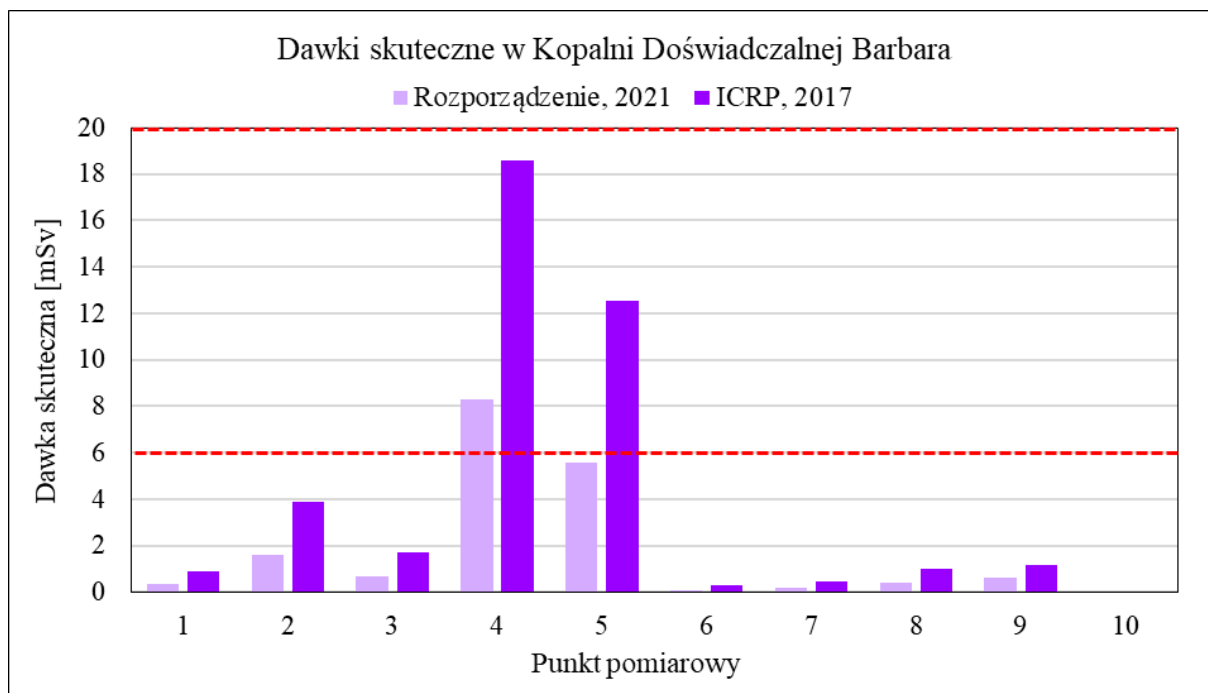
W Kopalni Doświadczalnej Barbara przeprowadzono serię pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Pomiary prowadzono w trzech miejscach. Na poziomie 30 m w rejonie szybu wydechowego oraz na poziomie 46 m w rejonie wcinki chodnika badawczego oraz szybu wydechowego. Na mapach (rys. 22 i 23) zaznaczono zieloną kropką miejsca pomiarów. W trakcie prowadzenia badań wentylacja włączana była o godzinie 6, a wyłączana o 14, od poniedziałku do piątku. W większości przypadków pomiary trwały dłużej niż 8 h, zatem warunki w trakcie pomiaru były zmienne. Pomiary były przeprowadzone zgodnie ze schematem opisanym w rozdziale 5. Natężenie przepływu powietrza pompowanego przez filtr wynosiło 1,9 l/min. W tabeli 20 przedstawiono wyniki pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. W tabeli 21 zamieszczono natomiast wartości obliczonych dawek skutecznych. Dawki skuteczne zostały obliczone zgodnie z równaniem 3.1, podobnie jak w przypadku powyżej, zastosowano współczynniki konwersji określone w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 11.08.2021 oraz te rekomendowane w raporcie ICRP (ICRP, 2017). Czas pracy przyjęty do obliczeń to 1800 h rocznie.

Tabela 20. Stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu w KD Barbara

Lp.	Miejsce pomiaru	Czas próbkowania [h]	Stężenie energii potencjalne alfa produktów rozpadu [ $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ]	
			radonu	toronu
1.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	20	$0,14 \pm 0,05$	$0,19 \pm 0,07$
2.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	20	$0,43 \pm 0,08$	$0,60 \pm 0,13$
3.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	20	$0,18 \pm 0,07$	$0,37 \pm 0,08$
4.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	17	$2,74 \pm 0,46$	$0,45 \pm 0,16$
5.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	23	$1,90 \pm 0,31$	$0,32 \pm 0,09$
6.	Rejon szybu wydechowego, poziom 46 m	19	$<0,03$	$0,14 \pm 0,07$
7.	Rejon szybu wydechowego, poziom 46 m	70	$0,14 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,04$
8.	Rejon szybu wydechowego, poziom 46 m	13	$0,13 \pm 0,04$	$0,22 \pm 0,12$
9.	Rejon szybu wydechowego, poziom 46 m	22	$0,29 \pm 0,06$	$0,10 \pm 0,05$
10.	Rejon szybu wdechowego, poziom 30 m	23	$0,05 \pm 0,02$	$0,04 \pm 0,04$

Zmierzone stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu wynosiły  $0,05$ - $2,74 \mu\text{J}/\text{m}^3$  i  $0,04$ - $0,51 \mu\text{J}/\text{m}^3$  dla produktów rozpadu toronu. Najniższe stężenia zarejestrowano w rejonach wlotu świeżego powietrza – rejon szybu wdechowego na poziomie 30 m. Najwyższe stężenie zmierzono we wcince chodnika badawczego na poziomie 46 m. Takie wartości PAEC oznaczają, że sumaryczne dawki skuteczne dla narażenia radonowego i toronowego mieszczą się w przedziale  $0,10$ - $8,27 \text{ mSv}$  (średnia  $1,79 \text{ mSv}$ ), stosując współczynniki konwersji uwzględnione w polskich przepisach. Natomiast dla współczynników konwersji rekomendowanych przez ICRP (ICRP, 2017), suma dawek skutecznych pochodzących od pochodnych radonu i toronu to zakres  $0,28$ - $18,58 \text{ mSv}$  (średnia  $4,05 \text{ mSv}$ ). Powyższe wyniki przedstawiono w tabeli 21 oraz na rys. 24, gdzie zaznaczono także limity dawek. Otrzymane dawki nie przekraczają wartości granicznej  $20 \text{ mSv}$ , jednak należy mieć na uwadze, że w rejonach oddalonych od wlotu świeżego powietrza, może dojść do przekroczenia tej wartości.





Rys. 24. Porównanie dawek obliczonych na podstawie różnych współczynników konwersji

Tabela 21. Obliczone dawki skuteczne dla pracowników KD Barbara (k-współczynniki konwersji w mSv/(mJ·m<sup>-3</sup>·h), D<sub>R</sub> i D<sub>T</sub> dawki odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu)

Lp.	Opis punktu pomiarowego	Dawki skuteczne D <sub>R</sub> i D <sub>T</sub> [mSv]					
		(Rozporządzenie, 2021)			(ICRP, 2017)		
		D <sub>R</sub> (k=1,4)	D <sub>T</sub> (k=0,5)	D <sub>R</sub> +D <sub>T</sub>	D <sub>R</sub> (k=3,1)	D <sub>T</sub> (k=1,4)	D <sub>R</sub> +D <sub>T</sub>
1.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	0,23	0,14	0,37	0,50	0,40	0,91
2.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	1,03	0,57	1,60	2,29	1,59	3,88
3.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	0,38	0,32	0,69	0,84	0,88	1,72
4.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	7,81	0,46	8,27	17,30	1,29	18,58
5.	Wcinka chodnika badawczego, poziom 46 m	5,32	0,28	5,60	11,77	0,78	12,56
6.	Rejon szybu wydechowego, poziom 46 m	0	0,10	0,10	0	0,28	0,28
7.	Rejon szybu wydechowego, poziom 46 m	0,20	0	0,20	0,45	0	0,45
8.	Rejon szybu wydechowego, poziom 46 m	0,18	0,22	0,39	0,39	0,60	1,00
9.	Rejon szybu wydechowego, poziom 46 m	0,63	0	0,63	1,17	0	1,17
10.	Rejon szybu wdechowego, poziom 30 m	0	0	0	0	0	0

### 7.3. Starożytne obiekty w Rzymie

Pomiary wykonano również w dwóch obiektach zlokalizowanych w Rzymie. Jednym z nich był dawny dom Nerona, a drugim termy Dioklecjana. W przeciwieństwie do wcześniej opisanych obiektów źródłem radonu/toronu nie są skały w wyrobiskach górniczych, lecz materiał budowlany – cegła tufowa, wykonana z tufu wulkanicznego. Tuf wulkaniczny to skała

osadowa powstała ze sprasowanego i zestalonego materiału piroklastycznego uwalnianego podczas erupcji wulkanicznej. Dzięki swoim właściwościom (niska masa, dobra izolacja termiczna, łatwość obróbki, dobra wytrzymałość) tuf znalazł zastosowanie jako materiał budowlany, wykorzystywany od czasów starożytnych, a w niektórych rejonach wykorzystywany jest nadal. Tuf, z którego produkowane są cegły, jest częścią materiału wyrzuconego podczas erupcji wulkanu Vico i jest najczęściej wydobywanym surowcem we Włoszech. Wulkan Vico jest stratowulkanem z zapadniętą centralną kalderą. Aktywność wulkanu składała się z czterech faz, a najlichniesze wylewy ignimbrytu i późniejsze formowanie się „tufo rosso a scorie nere” (tuf czerwony z żużłem wulkanicznym) miały miejsce w fazie trzeciej. Skała ma kolor od żółto-czerwonego do ciemnoszarego, zawiera czarne elementy porfiru, leucytu/analcymu i żużłu wulkanicznego.

Z tufu wulkanicznego zostało wybudowanych wiele obiektów w Rzymie, należą do nich między innymi Złoty Dom Nerona i Termy Dioklecjana. Oba te obiekty funkcjonują obecnie jako muzea. W obu muzeach przeprowadzono pomiary stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu w ramach niniejszej pracy. Dom Nerona usytuowany jest na wzgórzu Oppia w Rzymie. Kompleks o powierzchni 80 hektarów z ponad 150 pokojami był najbardziej imponującym i najdroższym pałacem w Rzymie. Częściowo zburzony pałac został ponownie odkryty pod koniec XV wieku. Złotego Domu przez lata nie można było zwiedzać z powodu zagrożeń, ale od 2014 roku część pomieszczeń i fresków można ponownie zobaczyć, odwiedzając muzeum. Stężenie energii potencjalnej alfa zmierzono także w zachowanych fragmentach wielkiego kompleksu łaźni publicznych, w Termach Dioklecjana. Oryginalnie kompleks zajmował powierzchnię 12 hektarów, a do jego budowy użyto cegły z tufu wulkanicznego i betonu rzymskiego. Muzeum znajduje się w miejscu znanym jako „Klasztor Michała Anioła” i innych budynkach, które były częścią klasztoru kartuzów, a także w kilku salach na południe od wschodniej palestry. We wnętrzach nowoczesnych pomieszczeń znajduje się obecnie muzeum epigraficzne.

W Domu Nerona przeprowadzono serię pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Pomiary prowadzono w dwóch punktach. Obiekt nie jest wyposażony w wentylację mechaniczną, wymiana powietrza następuje tylko w sposób naturalny przez wszelkiego rodzaju otwory. Ponieważ obiekt ten usytuowany jest w przyziemi, panują tam specyficzne warunki, temperatura wynosi 15 stopni, a wilgotność 90%. Podobnie jak we wcześniejszych przypadkach, pomiary były przeprowadzone zgodnie ze schematem opisanym w rozdziale 5. Natężenie przepływu powietrza pompowanego przez filtr wynosiło 1,9 l/min. Rys. 25 przedstawia przebieg pomiaru w Domu Nerona. Analogiczne pomiary przeprowadzono

w Termach Dioklecjana, gdzie wykonano dwa pomiary stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Z uwagi na ograniczoną dostępność do tego miejsca, czas próbkowania musiał być dostosowany do możliwych godzin wejścia do obiektu i wynosił 48 h. Wykonano także dwa pomiary stężenia energii potencjalnej alfa na wolnym powietrzu, tuż przy ścianie zbudowanej z cegły tufowej. W tym przypadku czas pobierania próbki wynosił 22 h.



Rys. 25. Jednoczesny pomiar stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu (zdjęcie własne)

W tabeli 22 przedstawiono wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu zebrane we wszystkich lokalizacjach w Rzymie. W tabeli umieszczono także czas pobierania próbek. Średnie stężenie PAEC produktów rozpadu radonu w Domu Nerona wynosiło  $2,05 \mu\text{J}/\text{m}^3$  ( $1,13\text{-}3,38 \mu\text{J}/\text{m}^3$ ), a produktów rozpadu toronu  $5,52 \mu\text{J}/\text{m}^3$  ( $1,73\text{-}10,94 \mu\text{J}/\text{m}^3$ ). Średnie PAEC zmierzone w Termach Dioklecjana wynosiło  $1,06 \mu\text{J}/\text{m}^3$  i  $1,41 \mu\text{J}/\text{m}^3$  odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu. Natomiast zmierzone stężenie energii potencjalnej alfa zmierzone na wolnym powietrzu w pobliżu ściany z cegły tufowej wynosiło średnio  $0,17 \mu\text{J}/\text{m}^3$  i  $0,50 \mu\text{J}/\text{m}^3$ , odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu.

Tabela 22. Pomiar stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu w wybranych obiektach w Rzymie

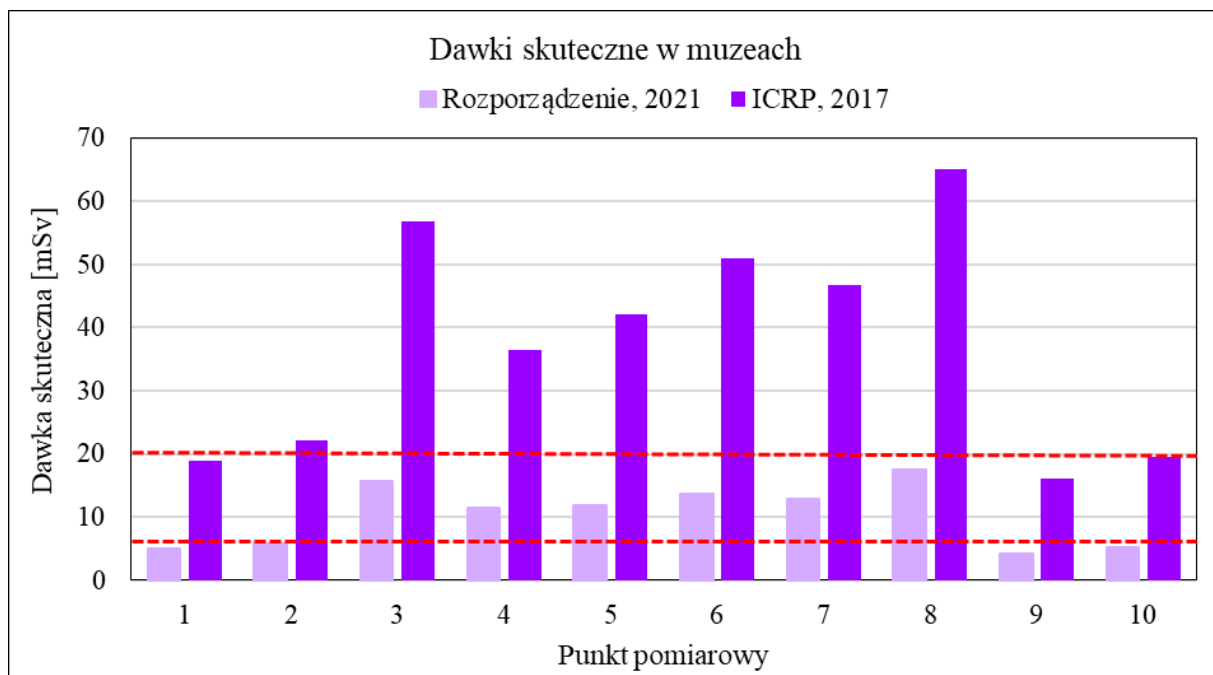
Lp.	Miejsce pomiaru	Czas próbkowania [h]	Stężenie energii potencjalne alfa produktów rozpadu [ $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ]	
			radonu	toronu
1.	Dom Nerona, sala 1	23	$1,13 \pm 0,29$	$1,77 \pm 0,29$
2.	Dom Nerona, sala 1	23	$1,40 \pm 0,32$	$1,73 \pm 0,36$
3.	Dom Nerona, sala 2	18	$2,25 \pm 1,13$	$7,08 \pm 1,24$
4.	Dom Nerona, sala 2	18	<1,13	$10,94 \pm 1,84$
5.	Dom Nerona, sala 2	23	$1,20 \pm 0,78$	$6,90 \pm 1,21$
6.	Dom Nerona, sala 2	23	$2,60 \pm 1,03$	$4,67 \pm 0,79$
7.	Dom Nerona, sala 2	23	$2,36 \pm 0,69$	$5,18 \pm 0,86$
8.	Dom Nerona, sala 2	16	$3,38 \pm 1,24$	$5,90 \pm 1,01$
9.	Termy Dioklecjana	48	$0,99 \pm 0,37$	$1,06 \pm 0,25$
10.	Termy Dioklecjana	48	$1,12 \pm 0,35$	$1,76 \pm 0,31$
11.	Ściana z cegły tufowej, na wolnym powietrzu	22	$0,19 \pm 0,12$	$0,58 \pm 0,11$
12.	Ściana z cegły tufowej, na wolnym powietrzu	22	$0,14 \pm 0,08$	$0,42 \pm 0,09$

Dawki skuteczne zostały obliczone zgodnie z wzorem 3.1. Podobnie jak w poprzednich przypadkach dawki obliczono w oparciu o współczynniki konwersji zawarte w rozporządzeniu Rady Ministrów (Rozporządzenie, 2021) oraz o te rekomendowane przez ICRP (ICRP, 2017). Czas pracy przyjęty do obliczeń wynosi 1800 h rocznie. Średnia dawka skuteczna uwzględniająca narażenia na pochodne radonu i toronu w Domu Nerona wynosiła 11,75 mSv (5,09-17,52 mSv) i 42,42 mSv (18,95-65,17 mSv) odpowiednio dla współczynników konwersji określonych w krajowych przepisach i rekomendowanych przez ICRP. W przypadku Term Dioklecjana średnie sumaryczne dawki były niższe i wynosiły 4,73 mSv (Rozporządzenie, 2021) i 17,83 mSv (ICRP, 2017). Wyniki te przedstawiono w tabeli 23. Rys. 26 przedstawia rozkład sumarycznych dawek skutecznych obliczonych na podstawie różnych współczynników konwersji. Widać wyraźnie, że w przypadku obiektów zbudowanych z cegły tufowej, wkład do dawki od produktów rozpadu toronu jest znacznie większy niż w przypadku Kopalni Srebra czy Kopalni Barbara. Przyczyną tego jest wysoka zawartości toru  $^{232}\text{Th}$  w tufie wulkanicznym. Powyższe przykłady pokazują, że istnieją sytuacje, kiedy pomiar produktów rozpadu toronu nie może być pomijany w ocenie dawek skutecznych. Dawki skuteczne niejednokrotnie przekraczają wartość

20 mSv, co wskazuje na konieczność wdrożenia działań zmierzających do ich redukcji. Działania takie można realizować poprzez ograniczenie czasu pracy, stosowanie środków ochrony indywidualnej czy poprawę wentylacji.

Tabela 23. Obliczone dawki skuteczne dla pracowników muzeów (k-współczynniki konwersji w mSv/(mJ·m<sup>-3</sup>·h), D<sub>R</sub> i D<sub>T</sub> dawki odpowiednio dla produktów rozpadu radonu i toronu)

Lp.	Miejsce pomiaru	Dawki skuteczne D <sub>R</sub> i D <sub>T</sub> [mSv]					
		(Rozporządzenie, 2021)			(ICRP, 2017)		
		D <sub>R</sub> (k=1,4)	D <sub>T</sub> (k=0,5)	D <sub>R</sub> +D <sub>T</sub>	D <sub>R</sub> (k=3,1)	D <sub>T</sub> (k=1,4)	D <sub>R</sub> +D <sub>T</sub>
1.	Dom Nerona, sala 1	3,33	1,76	2,82	13,31	5,64	18,95
2.	Dom Nerona, sala 1	4,08	1,79	5,87	16,33	5,73	22,06
3.	Dom Nerona, sala 2	8,27	7,40	15,66	33,06	23,67	56,74
4.	Dom Nerona, sala 2	0	11,41	11,41	0	36,52	36,52
5.	Dom Nerona, sala 2	4,74	7,21	11,95	18,95	23,07	42,02
6.	Dom Nerona, sala 2	8,90	4,82	13,72	35,58	15,44	51,02
7.	Dom Nerona, sala 2	7,43	5,35	12,78	29,74	17,11	46,84
8.	Dom Nerona, sala 2	11,39	6,13	17,52	45,56	19,61	65,17
9.	Termy Dioklecjana	3,18	1,06	4,24	12,70	3,48	16,19
10.	Termy Dioklecjana	3,45	1,77	5,23	13,81	5,67	19,48



Rys. 26. Porównanie dawek obliczonych na podstawie różnych współczynników konwersji

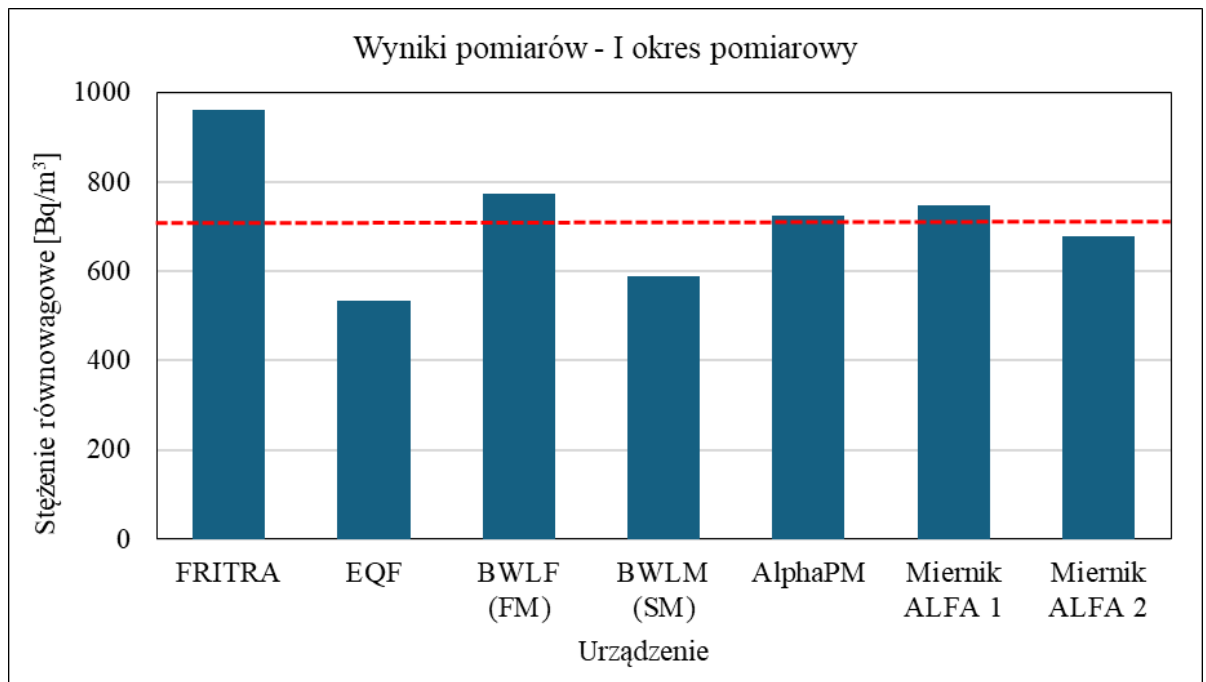
#### 7.4. Pomiary porównawcze w Zabytkowej Kopalni Srebra

W ramach projektu RadoNorm Towards effective radiation protection based on improved scientific evidence and social considerations – focus on Radon and NORM (W kierunku skutecznej ochrony radiologicznej w oparciu o udoskonalone dowody naukowe i względy społeczne – skupienie się na radonie i materiałach NORM) przeprowadzono międzynarodowe badania porównawcze stężenia promieniotwórczego produktów rozpadu radonu. Badania te odbyły się w Zabytkowej Kopalni Srebra w Tarnowskich Górach w dniach od 20 do 23 lutego 2024 r. Głównym celem tych pomiarów było porównanie wyników pomiaru produktów rozpadu radonu w rzeczywistych warunkach podziemnego miejsca pracy. Pomiar porównawczy przeprowadzono w komorze Srebrnej na głębokości 40 m. Wymiary komory są następujące: długość 25 m, szerokość 25 m i wysokość 3 m. Według specjalistów ds. wentylacji kopalni, wentylacja mechaniczna działała każdego dnia pomiarów od godziny 08:40 do godziny 15:00. Łącznie

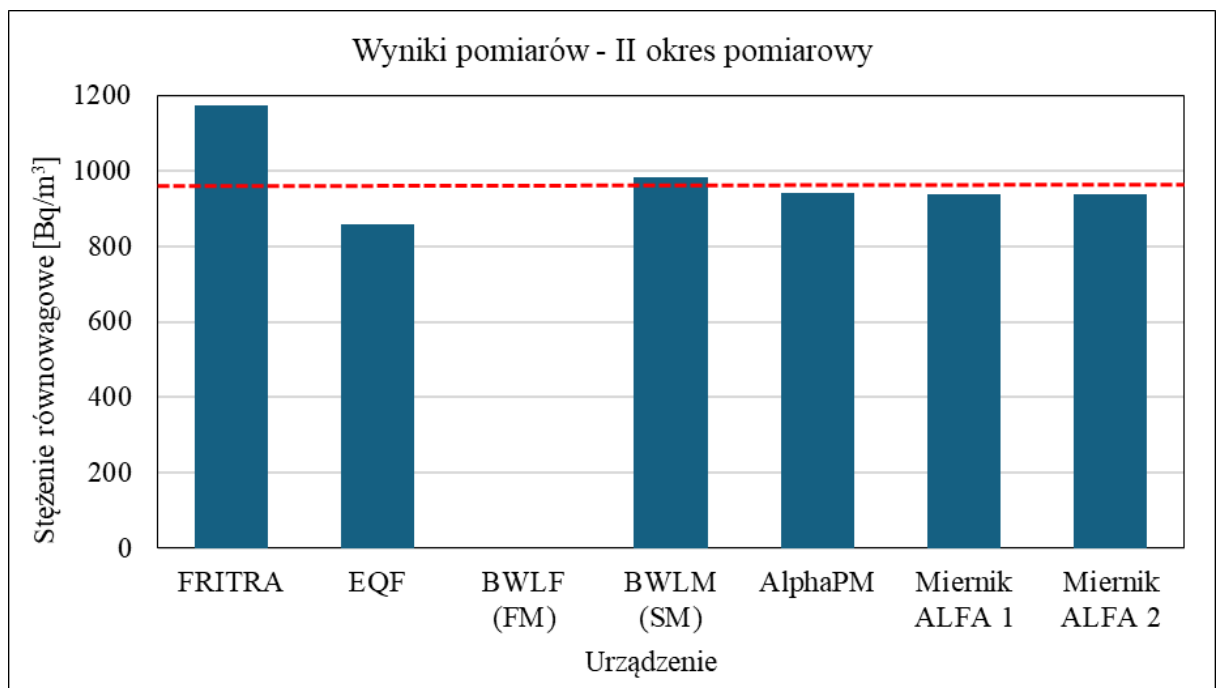
w tych badaniach wzięło udział 8 laboratoriów z siedmiu różnych krajów, mianowicie Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (Francja), Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (Polska), Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (Norwegia), Główny Instytut Górnictwa-PIB (Polska), Istituto Superiore di Sanità (Włochy), Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (Austria), Statni ustav radiacni ochrany (Czechy),

Universidad Autónoma de Barcelona (Hiszpania). Uczestniczące laboratoria przesłały 16 monitorów do ciągłego pomiaru stężenia radonu, 10 monitorów umożliwiających ciągły pomiar stężenia równowagowego (EEC) oraz system całkujący oparty na TLD do pomiaru PAEC. W niniejszym rozdziale ograniczono się jedynie do przedstawienia rezultatów badań w zakresie pomiaru stężenia równowagowego. W wyniku zastosowania opracowanej metoda otrzymuje się stężenia energii potencjalnej alfa, wartość tą można jednak w łatwy sposób (zgodnie z równaniem 2.5 i 2.8) przeliczyć na EEC. Aby móc porównać wyniki otrzymane przez uczestników wybrano trzy okresy pomiarowe: I: od 20.02.24, 10:25 do 20.02.24, 14:24, II: od 21.02.24, 10:55 do 21.02.24, 13:55 i III: od 22.02.24, 10:00 do 22.02.24:13:00. Poniższe wykresy (rys. 27-29) przedstawiają średnie wartości EEC z porównywanych urządzeń. Kompletny zestaw danych dla tych porównań pochodzi z siedmiu instrumentów – EQF (Sarad GmbH, Niemcy), AlphaPM (Bertin Technologies, Francja), dwa urządzenia BWLM (Tracerlab Engineering & Technology, Niemcy) i FRITRA (Jiri Plch SMM, Czechy), dwa mierniki ALFA (Two-Met, Polska). Średnia wartość z stężenia równowagowego ze wszystkich monitorów zilustrowana została poziomą linią. Porównanie krótkoterminowych (3-4 godzinnych) średnich EEC uzyskanych z monitorów pracujących w sposób ciągły oraz całkujących mierników alfa, opartych na TLD wykazało dobrą zgodność. W pierwszym okresie pomiarowym średnia wartość EEC zmierzona za pomocą urządzenia FRITRA wynosiła  $960 \text{ Bq/m}^3$ , dla urządzeń BWLM 774 i  $589 \text{ Bq/m}^3$ , średnie wskazanie AlphaPM to  $725 \text{ Bq/m}^3$ , a EQF  $534 \text{ Bq/m}^3$ , wartości zmierzone za pomocą miernika ALFA to 747 i  $677 \text{ Bq/m}^3$ . Średnia wartość EEC z wszystkich instrumentów to  $715 \text{ Bq/m}^3$ .





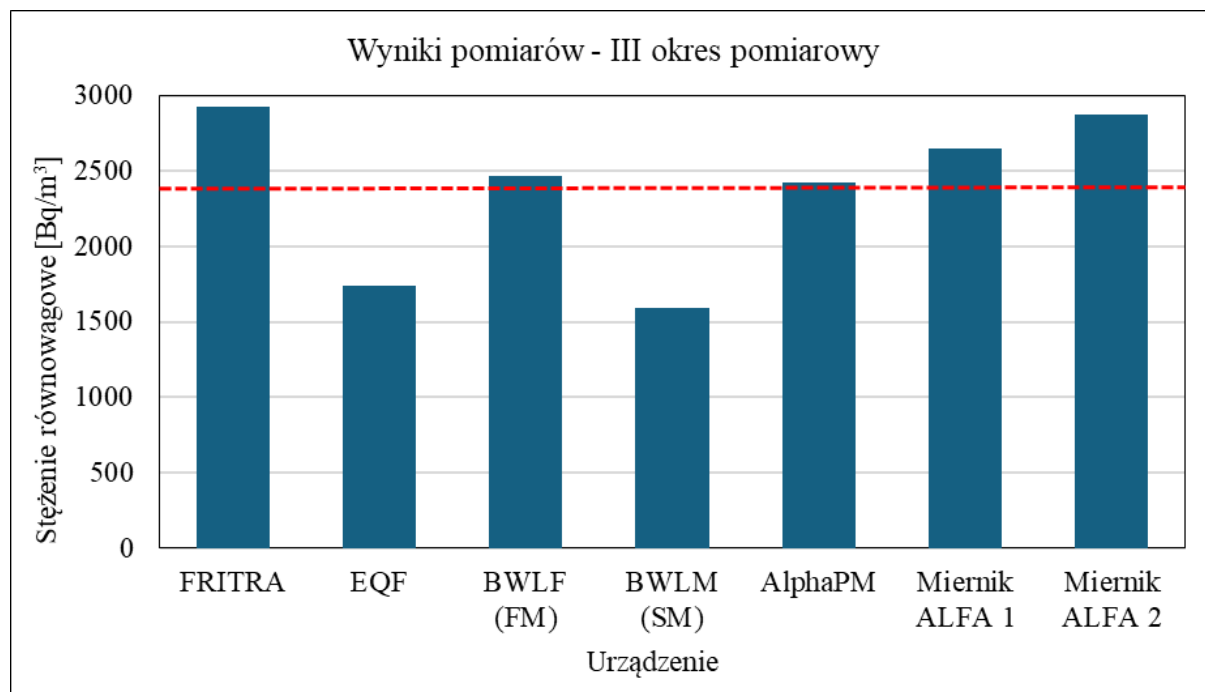
Rys. 27. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą różnych urządzeń w I okresie pomiarowym



Rys. 28. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą różnych urządzeń w II okresie pomiarowym

W drugim okresie pomiarowym, z powodu problemów technicznych z jednym z instrumentów porównywano ze sobą 6 rezultatów. Średnia wartość EEC zmierzona za pomocą urządzenia FRITRA wynosiła 1175 Bq/m<sup>3</sup>, BWLM 985 Bq/m<sup>3</sup>, średnie wskazanie AlphaPM to 943 Bq/m<sup>3</sup>, a EQF 860 Bq/m<sup>3</sup>, wartości zmierzone za pomocą miernika ALFA to 937 Bq/m<sup>3</sup> w obu przypadkach. Średnia wartość EEC z wszystkich instrumentów to 972 Bq/m<sup>3</sup>. W trzecim okresie

pomiarowym średnia wartość EEC zmierzona za pomocą urządzenia FRITRA wynosiła 2925 Bq/m<sup>3</sup>, dla urządzeń BWLM 2466 i 1592 Bq/m<sup>3</sup>, średnie wskazanie AlphaPM to 2426 Bq/m<sup>3</sup>, a EQF 1741 Bq/m<sup>3</sup>, wartości zmierzone za pomocą miernika ALFA to 2653 i 2872 Bq/m<sup>3</sup>. Średnia wartość EEC z wszystkich instrumentów to 2382 Bq/m<sup>3</sup>.



Rys. 29. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą różnych urządzeń w III okresie pomiarowym

Przeprowadzone pomiary in situ w Zabytkowej Kopalni Srebra, w Kopalni Doświadczalnej Barbara oraz w muzeach w Rzymie pokazały, że opracowana metoda może być z powodzeniem stosowana do jednoczesnych pomiarów stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Wyniki uzyskane podczas badań międzylaboratoryjnych wskazują, że opracowana metoda oceny stężenia energii potencjalnej alfa przyniosły podobne rezultaty, jak w przypadku instrumentów używanych przez pozostałe instytuty.

## 8. Podsumowanie

Praca koncentrowała się na opracowaniu metody, wykorzystującej detektory termoluminescencyjne, która umożliwiłaby jednoczesny pomiar stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. W pracy szczegółowo omówiono zagadnienia związane z promieniowaniem jonizującym, radonem, toronem oraz ich produktami rozpadu, a także ich wpływ na zdrowie ludzi. Ponadto w niniejszej dysertacji przedstawiono analizę obowiązujących przepisów prawnych, dotyczących obecności radonu/toronu i ich produktów rozpadu w środowisku pracy, a także opisano metody ich pomiaru. W pracy zawarto szczegółowy opis opracowanej metody oraz przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań, które potwierdzają skuteczność powyższej metody.

### **Najważniejsze osiągnięcia i wnioski płynące z pracy:**

**Zalety opracowanej metody** – Opracowana metoda jednoczesnego pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu posiada wiele zalet. Zaproponowany miernik alfa ma niewielkie rozmiary i niewielki ciężar, co pozwala na jego zastosowanie do pomiarów środowiskowych i indywidualnych. Miernik alfa umożliwia pomiar średniej wartości stężenia energii potencjalnej alfa w czasie jednej zmiany roboczej bez konieczności dostępu do zasilania sieciowego. W miejscach, gdzie dostępne jest zasilanie sieciowe można wydłużyć czas pomiaru aż do osiągnięcia pojemności pyłowej zastosowanego filtra. Detektory TL umieszczane w miernikach można stosować wielokrotnie, pod warunkiem, że przed każdym kolejnym pomiarem zostaną poddane określonej obróbce termicznej (anilacji). Detektory te nie wymagają zasilania. Metoda cechuje się wysoką precyzją oraz możliwością skutecznego rozróżniania stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu. Opracowana metoda pozwala zmierzyć stężenie energii potencjalnej alfa, na podstawie, którego można wyznaczyć dawkę skuteczną promieniowania, bez konieczności stosowania współczynników równowagi, jak ma to miejsce w przypadku mierników stężenia promieniotwórczego radonu. Dodatkową zaletą miernika jest niski koszt wykonania pomiaru oraz możliwość szerokiego zastosowania w różnych środowiskach pracy.

**Istotność pomiarów energii potencjalnej alfa** – Pomiary stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu pozwalają na dokładniejsze określenie narażenia radiacyjnego pracowników, w porównaniu do tradycyjnych metod pomiaru samego stężenia radonu lub toronu. O ile bowiem w przypadku radonu możliwe jest przyjęcie pewnego współczynnika

równowagi i wyliczenie dawki skutecznej, to dla toronu jest to zupełnie nierealne. Toron bowiem, w porównaniu do produktów jego rozpadu, ma znacznie krótszy czas połowicznego rozpadu. O ile w przypadku radonu w zaleceniach ICRP (ICRP, 2017) wymienia się współczynniki równowagi, które można przyjąć do oceny dawek, to brak ich dla toronu. Wartości współczynników konwersji wskazane w tych zaleceniach odnoszą się wyłącznie do stężenia równowagowego. Wynika stąd, że ocena dawek dla produktów rozpadu toronu, wymaga zmierzenia stężenia energii potencjalnej alfa, a stężenie samego toronu może być tylko wskaźnikiem informującym, że takie zagrożenie w ogóle występuje. Dzięki tej metodzie możliwe jest precyzyjne określenie dawki skutecznej, co wpływa na skuteczność działań ochronnych i zapobiegawczych. Zgodnie z ustawą Prawo atomowe (Prawo atomowe, 2000) i rozporządzeniem Ministra Energii (Rozporządzenie, 2016) stężenie energii potencjalnej alfa jest wielkością, na podstawie której należy oceniać dawkę skuteczną, co sprawia, że opracowana metoda jest przydatnym narzędziem do monitorowania warunków bezpieczeństwa pracy w podziemnych zakładach przemysłowych i górniczych, a także w obiektach na powierzchni, gdzie występuje narażenie na produkty rozpadu radonu i toronu.

**Konieczność monitorowania toronu** – Pomiary toronu, a w szczególności jego produktów rozpadu są wykonywane rzadko. Jednak jak pokazują wyniki badań, przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy, produkty rozpadu toronu mogą stanowić istotny wkład w dawkę skuteczną pracowników. Potwierdza to zasadność uwzględniania ich w monitoringu radiacyjnym. Analiza wyników badań pokazała, że w niektórych warunkach toron może stanowić główne źródło narażenia na promieniowanie jonizujące, co wcześniej było pomijane w standardowych ocenach.

**Kalibracja mierników** – Jednym z kluczowych elementów pracy było przeprowadzenie dokładnej kalibracji mierników alfa w atmosferze radonowej i toronowej. Przyjęta procedura zakłada wykorzystanie komory radonowej, do której włączano radon i toron celem wytworzenia atmosfery, o odpowiednim stężeniu promieniotwórczym produktów rozpadu radonu i toronu. Działania te umożliwiły precyzyjne określenie współczynników kalibracji mierników alfa. Wykazano, że współczynniki kalibracyjne mają porównywalne wartości, niezależnie od tego, czy źródłem promieniowania są produkty rozpadu radonu czy toronu. Dzięki temu kalibrację mierników można przeprowadzać w atmosferze radonowej, bez konieczności powtarzania tego procesu w atmosferze toronowej. To znacznie przyspiesza proces kalibracji i sprawia, że urządzenie jest o wiele bardziej konkurencyjne, niż inne dostępne na rynku mierniki, których kalibracja w atmosferze toronowej jest skomplikowanym procesem. Dokładna kalibracja pozwoliła także

na minimalizację błędów systematycznych, co czyni metodę bardziej wiarygodną i praktyczną w zastosowaniach przemysłowych oraz naukowych.

**Optymalizacja procedury pomiarowej** – Przeprowadzone badania pozwoliły zoptymalizować procedurę pomiaru stężenia energii potencjalnej produktów rozpadu radonu i toronu. Przebadano 3 rodzaje filtrów: celulozowy, polipropylenowy i poliwęglanowy. Wykazano, że do badań *in situ* najlepiej wyposażyć miernik w filtr z włókien polipropylenowych, gdyż jest on najbardziej wytrzymały przy wysokiej wilgotności powietrza. Natomiast do oceny stężenia referencyjnego podczas kalibracji mierników najlepiej stosować filtr celulozowy, gdyż charakteryzuje się największą wydajnością zbierania pochodnych. Przeprowadzono również eksperyment mający na celu sprawdzenie, czy mikrocyklon sprawia, że część pochodnych nie dociera do filtra. Otrzymane wyniki, w warunkach laboratoryjnych, pokazały, że mikrocyklon może zredukować sygnał, co w jakimś stopniu mogło być również spowodowane występowaniem frakcji wolnej. Dlatego sugeruje się stosowanie mierników alfa bez użycia mikrocyklonów. Analizując wyniki przeprowadzonych pomiarów *in situ* wnioskuję, że przy 12 godzinnym czasie poboru próbki możliwe jest osiągnięcie niskich limitów detekcji, a pomiar jest obciążony niewielką niepewnością. Niższe limity detekcji, poziomy krytyczne jak i niepewności pomiarowe uzyskuje się dla produktów rozpadu toronu. Wynika to z różnic w czasach połowicznego rozpadu i sposobach detekcji. Jeśli stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu są porównywalne, rzędu  $1 \mu\text{J}/\text{m}^3$ , to wartość ta może zostać zmierzona z precyzją 17% i 15% odpowiednio dla poziomu ufności 0,95 (2k), a limit detekcji wynosi odpowiednio 0,21 i  $0,17 \mu\text{J}/\text{m}^3$  dla radonu i toronu. Czas pomiędzy zakończeniem pobierania próbki, a przełożeniem filtra do nowego zestawu detektorów powinien wynosić minimum 5h.

**Pomiary w warunkach *in situ*** – Badania przeprowadzone w miejscach pracy (Zabytkowa Kopalnia Srebra w Tarnowskich Górach, Kopalnia Doświadczalna Barbara w Mikołowie, starożytne obiekty w Rzymie) wykazały dużą skuteczność zaproponowanej metody w realnych warunkach pracy. Wykonane pomiary wykazały, że w pewnych sytuacjach produkty rozpadu toronu stają się głównym źródłem narażenia i wówczas miernik pozwalający na jednoczesną ocenę stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu znajduje swoje zastosowanie. Badania wykazały, że stężenia radonu i toronu w podziemnych miejscach pracy mogą się znacząco różnić w zależności od warunków geologicznych, efektywności wentylacji oraz charakterystyki aerozoli w danym miejscu. W szczególności wykazano, że efektywność systemów wentylacyjnych ma istotny wpływ na transport i depozycję produktów rozpadu radonu i toronu. Dlatego też monitorowanie tych parametrów jest kluczowe dla dokładnej oceny

narażenia. Wykorzystanie wyników pomiarów terenowych PAEC pozwoliło na ocenę rzeczywistych wartości dawek skutecznych.

**Zgodność z innymi metodami** – W celu weryfikacji metody wzięto udział w badaniach międzylaboratoryjnych, w których porównano rezultaty otrzymane z 7 instrumentów. Wykazano dobrą zgodność pomiędzy wynikami otrzymanymi przy użyciu mirników alfa, a tymi, które otrzymali pozostali uczestnicy badań porównawczych, wykorzystujący inne urządzenia.

**Działania ograniczające narażenie** – Bazując na pomiarach stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu i ocenie dawki skutecznej możliwe jest wyznaczenie działań ograniczających narażenie na promieniowanie. Do działań takich zaliczyć można ograniczenie czasu kontaktu ze źródłem przez skrócenie czasu pracy, stosowanie środków ochrony indywidualnej (np. maseczek) czy poprawę lub instalację systemu wentylacji w miejscach pracy.

**Jako dalszy kierunek do doskonalenia opracowanej metody proponuję następujące działania:**

**Poprawa konstrukcji urządzenia** – Należy skupić wysiłki nad skonstruowaniem urządzenia w taki sposób, aby jego zastosowanie było dla użytkownika jak najłatwiejsze. Procedura przekładania filtra do nowego zestawu detektorów TL powinna być zautomatyzowana, a całe urządzenie powinno być wyposażone w pamięć wewnętrzną do archiwizacji wyników oraz parametrów pomiaru, takich jak natężenie przepływu powietrza przez filtr czy czas pobierania próbki. Opracowanie bardziej zautomatyzowanej procedury analizy danych mogłoby przyspieszyć i uprościć proces oceny narażenia.

**Rozszerzenie badań na inne środowiska pracy** – Przeprowadzenie pomiarów w dodatkowych lokalizacjach, takich jak kopalnie rud metali, czy obiekty podziemne o różnym stopniu wentylacji, pozwoliłoby na dalszą weryfikację metody i dostosowanie jej do specyficznych warunków różnych środowisk pracy.

**Zastosowanie nowoczesnych technologii detekcyjnych** – Rozwój detektorów termoluminescencyjnych o wyższej czułości może poprawić dokładność pomiarów.

Podsumowując, praca dostarcza istotnych danych w obszarze zagadnienia narażenia pracowników na promieniowanie jonizujące i proponuje nowoczesne metody jego monitorowania. Wyniki badań mogą przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa i skuteczniejszej ochrony zdrowia osób pracujących w środowisku o podwyższonej promieniotwórczości naturalnej.

**Cel naukowy pracy**, jakim była optymalizacja procedury monitoringu radiacyjnego, techniki pobierania próbek w miejscach pracy oraz dobór czasu prowadzenia kontroli umożliwiający jednoczesny pomiar ekspozycji na produkty rozpadu radonu i toronu został zrealizowany. Opracowano metodę pomiarową obejmującą zasady prowadzenia pomiaru stężenia energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu i toronu, sposób wykonania kalibracji i ocenę niepewności pomiarowych.

Również **cel użytkowy**, którym było wyznaczenie dawek związanych z wniknięciem drogą oddechową produktów rozpadu radonu i toronu na stanowiskach pracy, został zrealizowany. Oceniono zagrożenia związane z obecnością izotopów radonu i ich produktów rozpadu w różnych obiektach i wskazano na działania ograniczające zagrożenie.

## Literatura

- Agency For Toxic Substances And Disease Registry [ATSDR]. 2022. <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/radon/standards.html> (2024-09-24).
- Agricola, G., 1556. De Re Metallica libri XII. Basileae M. D. LVI. Wydawnictwo Froben, Cum Priuilegio Imperatoris in annos v. & Galliarum Regis ad Sexennium.
- Al-Jaseem, O., K., Almasoud, F., Ababneh, A., Al-Hobaib, A.S. 2016. Radiological assessment of water treatment processes in a water treatment plant in Saudi Arabia: Water and sludge radium content, radon air concentrations and dose rates. *Science of The Total Environment*, 563–564, 1030-1036.
- Atlas Radiologiczny Polski 2011. Główny Inspektor Ochrony Środowiska. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, 2012.
- Bale, W.F., Shapiro, J.V., 1956. Radiation dosage to lungs from radon and its daughter products. *Proceedings of the International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy*, 13, 233-236, New York, United Nations.
- Bonczyk, M., Chałupnik, S., Wysocka, M., Grygier, A., Hildebrandt, R., Kies, Z. T., 2022. The determination of radon/thoron exhalation rate in an underground coal mine-preliminary results. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (10), 6038.
- Busigin, A., Philips, C.R. 1980. Uncertainties in the measurement of airborne radon daughters. *Health Physics*, 39, 343-955.
- Campos, L.L., Lima, M.F., 1987. Thermoluminescente CaSO<sub>4</sub>:Dy Teflon Pellets for beta radiation detection. *Radiation Protection Dosimetry*, 18 (2), 95-97.
- Cliff, K.D. 1978. The measurement of low concentrations of Rn-222 daughters in air, with emphasis on RaA assessment. *Physics in Medicine & Biology*, 23, 55.
- Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom.
- Crozier, W.D. 1969. Direct measurement of radon-220 (thoron) exhalation from the ground. *Journal of Geophysical Research*, 74, 4199-4205.
- Currie, L.A. 1968. Limits for quantitative detection and quantitative determination. Application for radiochemistry. *Analytical Chemistry*. 40 (3), 586-593.



Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Schaffrath Rosario, A., Tirmarche, M., Tomásek, L., Whitley, E., Wichmann, H-E, Doll, R. 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330(7485), 223-227.

Del Sol Fernández, S., Garcia-Salcedo, R., Guzmán-Mendoza, J., Sánchez-Guzmán, D., Rodriguez, G.R., Gaona, E., Rivera Montalvo, T. 2016. Thermoluminescent characteristics of LiF:Mg,Cu,P and CaSO<sub>4</sub>:Dy for low dose measurement. *Applied Radiation and Isotopes*, 111, 50-55.

De Wayne C., L., Green, J.R. 2012. Rozdział: Radon-222 in Environmental tracers in subsurface hydrology. 2012. Springer New York.

Duggan, M.J., Howell, D.M. 1968. A method for measuring the concentration of the short-lived daughter products of radon-222 in the atmosphere. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 19, 865-870.

Dzięgiel, M., 2008. Podziemne trasy turystyczne w Tarnowskich Górach (Górny Śląsk). *Geoturystyka*, 4 (15), 51-62.

EPA. 2024. <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon> (2024-09-24).

Field, R.W. 2019. Radon: An Overview of Health Effects. *Encyclopedia of Environmental Health*. Elsevier B.V, Second Edition, 467-475.

Fijałkowska-Lichwa, L., 2015. Estimation of radon risk exposure in selected underground workplaces in the Sudetes (southern Poland), *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8, pp. 334-353.

Fijałkowska-Lichwa, L., 2016. Extremely high radon activity concentration in two adits of the abandoned uranium mine 'Podgórze' in Kowary (Sudety Mts., Poland), *Journal of Environmental Radioactivity* 165, pp. 13-23.

Frank, A.I., Benton, E.V. 1977. Radon dosimetry using plastic nuclear track detectors. *Nuclear Track Detection*, 1, 149-179.

Frumkin, H., Jonathan, M., Samet, Radon. 2001. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 51, 6, 337-344.

GIS. 2021. *Narażenie Na Radon W Pomieszczeniach Oraz Związane Z Narażeniem Na Radon Zagrożenie Dla Zdrowia*, Główny Inspektor Sanitarny, Warszawa.

Gov. 2025. <https://www.gov.pl/web/poznajradon/mapy-radonowe2> (dostępna w dniu 16.02.2025)

- Grygier, A., Skubacz, K., Wysocka, M., Bonczyk, M., Piech, A., Janik, M. 2022. Radon Exposure in the Underground Tourist Route–Historic Silver Mine in Tarnowskie Góry, Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 15778.
- Grygier, A., Skubacz, K. 2024. Radon Equilibrium Factor and the Assessment of the Annual Effective Dose at Underground Workplaces. *Atmosphere*, 15 (19), 1131.
- Guzik, O., Piechulska, B., 1968. Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50000. Arkusz Bytom (M34-50D). Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, pp. 64-67.
- Handbook of Chemistry and Physics. 2014. [Editor] Haynes, W.M. CRC Press, 95<sup>th</sup> Edition. Taylor and Francis Group. ISBN 978-1-4822-0868-9. London, New York.
- Hahn O. and Müller H.O. 1923. Eine neue methode zum Studium der Oberfläche und Oberflächenänderung Feinverteilter Niederschläge. *Zeitschrift für Elektrochemie*, 29, 189-192.
- Harley, J.H., 1978. Radon-222 measurement. U.S. Department of Energy Environment Measurement Laboratory Rep. EML-347, New York, 30-65.
- ICRP, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Ann. ICRP* 46(3/4).
- Iida, T., Ikebe, Y., Suzuki, K., Ueno, K., Wang, Z., Jin, Y. 1996. Continuous measurements of outdoor radon concentrations at various locations in East Asia. *Environment International*, 22 (1), 139-147.
- IARC. 1988. International Agency of Research in Cancer. Man-made Mineral Fibres and Radon. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 43. ISBN-13: 978-92-832-1243-0. WHO Press.
- Iimoto, T., Kosako, T., Sugiura, N., Kawashima, K. 2005. Development of a method for estimating the airborne concentration of radon progeny, using an imaging plate. *Radioactive in the environment*, 7, 535-541.
- Irfan, M., Fagan, A.J. 1979. Measurement of radon daughter in air using gamma spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods*, 166, 567-5701.
- Islam, G.S., Haque, A.K.F. 1994. Measurement of mixed radon and thoron daughter concentrations using alpha and beta activities filtered from air. *Radiation Measurements*, 23, 4, 737-742.
- Jacobi, W., Andre, K., 1963. The vertical distribution of radon 222 and radon 220 and their decay products in the atmosphere. *Health Physics*, 22, 441-450.
- Jonassen, N., Hayes, E.I. 1974. A correction when measuring <sup>222</sup>Rn daughter concentrations by alpha spectroscopy of filter samples. *Health Physics*, 27, 310-313.

- Kerr, G.D. 1975. Measurement of radon progeny concentrations in air by alpha-particle spectrometry. Oak Ridge National Laboratory Report. ORNL-TM-4924.
- Khan, A., Philips, C.R. 1986. A simplified method for determining the potential alpha energy of radon and thoron progeny mixtures in uranium mines. *Radiation Protection Dosimetry*, 16, 3, 1, 231–235.
- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., Alavanja, M., Catalan, V.S., Field, R.W., Klotz, J.B., Létourneau, E.G., Lynch, C.F., Lyon, J.I., Sandler, D.P., Schoenberg, J.B., Steck, D.J., Stolwijk, J.A., Weinberg, C., Wilcox, H.B. 2005. Residential radon and risk of lung cancer. A combined analysis of seven North American case-control studies. *Epidemiology*, 16, 137-145.
- Lebecka, J., Skowronek, J., Tomza, I., Michalik, B., Chałupnik, S., Skubacz, K., 1988. A thermoluminescent monitor of low radon – daughter concentrations in air. *Applied Radiation and Isotopes*, 39, 9, 987-992.
- Lubin, J.H., Wang, Z.Y., Boice, J.D., Xu, Z., Y., Blot, W., J., Wang, L.S., Kleinerman, R.A. 2004. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *International Journal of Cancer*, 109, 132-137.
- Mandowski, A., 2004. Termoluminescencja w przestrzennie skorelowanych układach pułapkowych. Wydawnictwo Akademii im. Jana Długosza, Częstochowa, 2004.
- Martz, D.E., Holleman, D.F., McCurdy, D.E., Schiager, K.J. 1969. Atmospheric concentrations of RaA, RaB and RaC by alpha spectroscopy. *Health Physics*, 17, 131-138.
- Marsh, J.W., Birchall, A., Butterweck, G., et al. 2002. Uncertainty analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure to radon progeny in the home. *Radiation Protection Dosimetry*, 102, 229-248.
- Mohamed, A., Ahmed, A.A., Ali, A.E., Yuness, M., 2008. Attached and Unattached Activity Size Distribution of Short-Lived Radon Progeny (214Pb) and Evaluation of Deposition Fraction. Proceedings of the Third Environmental Physics Conference (EPC-2008), 19-23 Feb. 2008, Aswan, Egypt.
- National Research Council [NRC]. 1998. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Health effects on exposure to low levels of radon. BEIR VI. National Academy Press, Washington, DC.
- Nazaroff, W.W. 1984. Optimizing the total-alpha three-count technique for measuring concentrations of radon progeny in residences. *Health Physics* 46, 395-405.
- Nazaroff, W.W., Nero, A.V. 1988. Radon and its decay products in indoor air. New York, John Wiley&Sons, Inc.
- Niewiadomski, T., Ryba, E. 1983. Development of TL instruments for simultaneous radon and radon daughter monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*, 6, 1, 67-69.
- Niewiadomski T. Dozymetria termoluminescencyjna w praktyce. Instytut Fizyki Jądrowej, Kraków, 1991.

- Nikezic, D., Baixeras, C. 1996. Radon, radon progeny and equilibrium factor determination using an LR115 detector. *Radiation Measurements*, 26, 203-213.
- Nikezic, D., Ng, F.M.F., Yu, K.N. 2004. Theoretical basis for long-term measurements of equilibrium factor using LR 115 detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 61, 1431-1435.
- Nikezic, D., Yu, K.N. 2010. Long-term determination of airborne concentrations of unattached and attached radon progeny using stacked LR 115 detectors with multi-step etching. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 613, 245-250.
- Norma. 1998. Norma PN-EN 481:1998: Atmosfera miejsca pracy. Określenie składu ziarnowego dla pomiaru cząstek zawieszonych w powietrzu.
- Nuclear data. 2024. <http://nucleardata.nuclear.lu.se/> (2024-05-16).
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). 2022. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1096> (2024-09-24).
- Parmaksız, A., Ağuş, Y., Bulgurlu, F., Bulur, E., Öncü, T., Özkök, Y.Ö. 2015. Measurement of enhanced radium isotopes in oil production wastes in Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 141, pp. 82-89.
- Pogorski, S.R., Philips, C.R. 1986. The bias error in radon and thoron progeny measurements when sample collection is carried out in the presence of temporal concentration variations. *Radiation Protection Dosimetry*, 14 (1), 47-54.
- Porstendörfer, J. 1994. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *Journal of Aerosol Science*, 25, 2, 219-263.
- Porstendörfer, J., Zock, Ch., Wendt, J., Reineking, A. 1999. Radon parameters in outdoor air. *International symposium on technologically enhanced natural radiation*, Rio de Janeiro, 1999.
- Porstendörfer, J. 2001. Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products. *Radiation Protection Dosimetry*, 94, 365-373.
- Porstendörfer, J., Reineking, A. 2000. Radon characteristics related to dose for different places of the human. In: *proc. IRPA-10 Conf., Hiroshima, Japan*.
- Portal gov.pl, <https://www.gov.pl/web/poznajradon/mapy-radonowe2> (24.09.2024).
- Prawo atomowe. 2000. Ustawa prawo atomowe z dnia 29 listopada 2000 r. wraz z późniejszymi zmianami (Dz.U.2023.1173).

- Rangarajan, C., Chandrasekaran, V.R., Gopalakrishnan SMT.S., Eapen, C.D. 1974. Determination of radon daughters' disequilibrium in air by gamma spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods*, 117, 573-578.
- Reineking, A., Becker, K.H., Porstendörfer, J. 1985. Measurements of the unattached fractions of radon daughters in houses. *Science of The Total Environment*, 45, 261-270.
- Rozporządzenie. 2016. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2017 poz. 1118).
- Rozporządzenie. 2020. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz.U. 2020 poz. 1139).
- Rozporządzenie. 2021. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz.U. 2021 poz. 1657).
- Schery, S.D. 1990. Thoron in the Environment, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 40:4, 493-497.
- Sesana, L., Caprioli, E., Marcazzan, G.M. 2003. Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 65, 2, 147-160.
- Shang, B., Chen, B., Gao, Y., Wang, Y., Cui, H., Li, Z., Doi. 2005. Thoron levels in traditional Chinese residential dwellings. *Radiation and environmental biophysics*, 44, 193–199.
- Skowronek, J. 1999. Radiation Exposure To Miners In Polish Coal Mines. *Radiation Protection Dosimetry*, 82(4), 293-300.
- Skowronek, J. 2007. Naturalne źródła promieniowania jonizującego w kopalniach, w: *Zagrożenia naturalnymi źródłami promieniowania jonizującego w przemyśle wydobywczym*, red. Skowronek, J., Katowice, 2007, GIG, ISBN 978-83-87610-90-6, 186.
- Skubacz, K., Michalik, B. Modeling: Activity Concentration of Radon, Thoron, and Their Decay Products in Closed Systems. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, 19 (24), 16739. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416739>.
- Skubacz, K., Wołoszczuk, K., Grygier, A., Samolej, K. Influence of Dose Conversions, Equilibrium Factors, and Unattached Fractions on Radon Risk Assessment in Operating and Show Underground Mines. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 5482. <https://doi.org/10.3390/ijerph20085482>.

- Steck, D. J. 2009. Annual average indoor radon variations over two decades. *Health Physics*, 96(1), 37-47.
- Smetsers, R., Blaauboer, R., Diekker, F., 2018. Radon and thoron in Dutch dwellings, *Radiation Protection Dosimetry*, 181 (1).
- Stajic, J.M., Nikezic, D. 2015. The accuracy of radon and thoron progeny concentrations measured through air filtration. *Journal of Environmental Radioactivity*, 140, 50-58.
- Stupnicka, E., 2007. *Geologia regionalna Polski*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, pp. 203-209.
- Stranden, E., Kolstad, A.K., Lind, B. 1983. The ETB dosimeter, a passive integrating radon dosimeter combining activated charcoal and TLD. *Radiation Protection Dosimetry*, 5, 4, 241-215.
- Tanner A.B. 1964. Physical and chemical controls on the distribution of radium-226 and radon-222 in groundwater near Great Salt Lake, Utah. In *The Natural Radiation Environment*, eds. J.A.S. Adams and W.M. Lowder, 256-276. University of Chicago Press, Chicago, III.
- Tanner, A.B. 1980. Radon migration in the ground: a supplementary review. In *Proceedings Natural Radiation Environment III*. Technical Inf. Center, US Department of Energy, Washington D.C., CONF-780422.
- Thomas, J.W. 1970. Modification of the Tsivoglou method for radon daughters in air. *Health and Safety Laboratory U.S. Atomic energy Commission*, New York, 10014.
- Tokanami, S., Iimoto, T., Kurosawa, R. 1996a. Continuous measurement of the equilibrium factor,  $F$  and the unattached fraction,  $f_p$  of radon progeny in the environment. *Environment International*, 22 (1), S611-S616.
- Tschiersch, J., Li, W.B., Meisenberg, O. 2007. Increased indoor thoron concentrations and implication to inhalation dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 127, 73-789.
- Tsivoglou, E.C., Ayer, H.E., Holaday, D.A. 1953. Occurrence of non-equilibrium atmospheric mixtures of radon and its daughters, *Nucleonics*, 11(9), 40.
- Tsivoglou, E. C. 1953. Quantitative description of successive transformations in atmospheric samples. Dissertation, The Ohio State University.
- UE. 2024. Zalecenie Komisji (UE) 2024/440 z dnia 2 lutego 2024 r. w sprawie stosowania współczynników dawki na potrzeby oszacowania dawki skutecznej i dawki równoważnej do celów dyrektywy Rady 2013/59/Euratom.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations [UNSCEAR]. 2013. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Volume I: Report to the General Assembly and scientific Annex A. UNSCEAR 2013 Report., New York, 2014.

Vargas, A., Ortega, X., Porta, M. 2000. Dose conversion factor for radon concentration in indoor environments using a new equation for the F-fp correlation. *Health Physics*, 78, 80-85.

Vaupotic, J., 2007. Nano-size radon short-lived progeny aerosols in Slovenia kindergartens in wintertime. *Chemosphere*, 69, 856-863.

Virk, H.S., Sharma, N. 2002. Indoor radon/thoron levels and inhalation doses to some populations in Himachal Pradesh, India. *Journal of Environmental Monitoring*, 4(1).

Wang, Y., Sun, C., Zhang, L., Guo, Q. 2021. Optimized method for individual radon progeny measurement based on alpha spectrometry following the Wicke method. *Radiation Measurements*, 142, 106558.

Wang, H., Yang, J., Sun, C., Zhang, L., Guo, Q. 2022. Newly designed measurement system for the radon progeny activity size distribution based on screen diffusion battery. *Radiation measurements*, 159, 106865.

WHO. 2009. Library Cataloguing-in-Publication Data. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. ISBN: 9789241547673.

Wicke, A. 1979. Untersuchungen zur Frage der natürlichen Radioaktivität der Luft in Wohn- und Aufenthaltstraumen. Ph.D. thesis. University of Gießen.

Wilkening, M.H., Clements, W.E. and Stanley, D. 1972. Radon-222 flux measurements in widely separated regions. In *The Natural Radiation Environment II*, p. 2. U.S. Department of Energy, Washington D.C. CONF-720805.

World Health Organization [WHO]. 2009. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. ISBN 978-92-4-154767-3.

Wysocka, M., Skubacz, K., Bonczyk, M., Chałupnik, S., Samolej, K., Chmielewska, I., Michalik, B. 2021. The system of monitoring and controlling natural radiation hazards in Polish coal mines. *International Journal of Mining and Mineral Engineering* 12(3), 229, DOI:10.1504/IJMME.2021.10043033.

Yamada, Y., Fukutsu, K., Tokonami, S., Ishikawa, T., Zhuo, W., Furukawa, M., Yonehara, H. Size measurements of radon decay products by diffusion method. 2024. Proceedings of the 4th European conference on protection against radon at home and at work. Prague, Czech Republic.

Yu, K.N., Nikezic, D., Ng, F.M.F., Leung, J.K.C. 2005. Long-term measurements of radon progeny concentrations with solid-state nuclear track detectors. *Radiation Measurements*, 40, 560-568.

Zagrożenia naturalnymi źródłami promieniowania jonizującego w przemyśle wydobywczym. 2007. Główny Instytut Górnictwa, praca zbiorowa pod redakcją Jana Skowronka. ISBN 978-83-87610-90-6.

Zhang, C., Luo, D. 1983. Measurement of mixed radon and thoron daughter concentrations in air. *Nuclear Instruments and Methods*, 215, 481-488.

Zimen K.E. and Mertens P. 1971. Kernrückstoss. In festen stoffen und knock-out-effekt. *Z. Naturforsch. A.* 26, 773-775.

Zunic, Z., Stojanovska, Z., Veselinovic, N., 2017. Indoor radon, thoron and their progeny concentrations in high thoron rural Serbiae Environments, *Radiation Protection Dosimetry*, 177 (1-2).



## Dodatek 1

### 1. Funkcje $\Gamma_{ij}(t_p, t_1, t_2)$

Wielkość  $t_p$  to czas pompowania, a  $t_1$  oraz  $t_2$  początek i koniec czasu detekcji w stosunku do momentu rozpoczęcia pompowania.

$$\Gamma_{11}(t_p, t_1, t_2)$$

$$- t_2 \leq t_p$$

$$\Gamma_{11}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{11}(t_2) - \text{Int}F_{11}(t_1)$$

$$- t_1 > t_p$$

$$\Gamma_{11}(t_p, t_1, t_2) = F_{11}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{11}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{11}(t_p, t_1))$$

$$- t_1 \leq t_p \text{ oraz } t_p < t_2$$

$$\Gamma_{11}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{11}(t_p) - \text{Int}F_{11}(t_1) + F_{11}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{11}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{11}(t_p, t_p))$$

$$\Gamma_{21}(t_p, t_1, t_2)$$

$$- t_2 \leq t_p$$

$$\Gamma_{21}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{21}(t_2) - \text{Int}F_{21}(t_1)$$

$$- t_1 > t_p$$

$$\Gamma_{21}(t_p, t_1, t_2) = F_{11}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{21}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{21}(t_p, t_1)) + F_{21}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{22}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{22}(t_p, t_1))$$

$$- t_1 \leq t_p \text{ oraz } t_p < t_2$$

$$\Gamma_{21}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{21}(t_p) - \text{Int}F_{21}(t_1) + F_{11}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{21}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{21}(t_p, t_p)) + F_{21}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{22}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{22}(t_p, t_p))$$

$$\Gamma_{22}(t_p, t_1, t_2)$$

$$- t_2 \leq t_p$$

$$\Gamma_{21}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{22}(t_2) - \text{Int}F_{22}(t_1)$$

$$- t_1 > t_p$$

$$\Gamma_{21}(t_p, t_1, t_2) = F_{22}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{22}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{22}(t_p, t_1))$$

$$- t_1 \leq t_p \text{ oraz } t_p < t_2$$

$$\Gamma_{21}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{22}(t_p) - \text{Int}F_{22}(t_1) + F_{22}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{22}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{22}(t_p, t_p))$$

$$\Gamma_{31}(t_p, t_1, t_2)$$

$$- t_2 \leq t_p$$

$$\Gamma_{31}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{31}(t_2) - \text{Int}F_{31}(t_1)$$

$$- t_1 > t_p$$

$$\Gamma_{31}(t_p, t_1, t_2) = F_{11}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{31}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{31}(t_p, t_1)) + F_{21}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{32}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{32}(t_p, t_1)) + F_{31}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{33}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{33}(t_p, t_1))$$

- $t_1 \leq t_p$  oraz  $t_p < t_2$

$$\Gamma_{31}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{31}(t_p) - \text{Int}F_{31}(t_1) + F_{11}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{31}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{31}(t_p, t_p)) + \\ F_{21}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{32}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{32}(t_p, t_p)) + F_{31}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{33}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{33}(t_p, t_p))$$

$$\Gamma_{32}(t_p, t_1, t_2)$$

- $t_2 \leq t_p$

$$\Gamma_{32}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{32}(t_2) - \text{Int}F_{32}(t_1)$$

- $t_1 > t_p$

$$\Gamma_{32}(t_p, t_1, t_2) = F_{22}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{32}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{32}(t_p, t_1)) + F_{32}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{33}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{33}(t_p, t_1))$$

- $t_1 \leq t_p$  oraz  $t_p < t_2$

$$\Gamma_{32}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{32}(t_p) - \text{Int}F_{32}(t_1) + F_{22}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{32}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{32}(t_p, t_p)) + \\ F_{32}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{33}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{33}(t_p, t_p))$$

$$\Gamma_{33}(t_p, t_1, t_2)$$

- $t_2 \leq t_p$

$$\Gamma_{33}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{33}(t_2) - \text{Int}F_{33}(t_1)$$

- $t_1 > t_p$

$$\Gamma_{33}(t_p, t_1, t_2) = F_{33}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{33}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{33}(t_p, t_1))$$

- $t_1 \leq t_p$  oraz  $t_p < t_2$

$$\Gamma_{33}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{33}(t_p) - \text{Int}F_{33}(t_1) + F_{33}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{33}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{33}(t_p, t_p))$$

$$\Gamma_{41}(t_p, t_1, t_2)$$

- $t_2 \leq t_p$

$$\Gamma_{41}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{41}(t_2) - \text{Int}F_{41}(t_1)$$

- $t_1 > t_p$

$$\Gamma_{41}(t_p, t_1, t_2) = F_{11}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{41}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{41}(t_p, t_1)) + F_{21}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{42}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{42}(t_p, t_1)) + \\ + \\ F_{31}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{43}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{43}(t_p, t_1)) + F_{41}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{44}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{44}(t_p, t_1))$$

- $t_1 \leq t_p$  oraz  $t_p < t_2$

$$\Gamma_{41}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{41}(t_p) - \text{Int}F_{41}(t_1) + F_{11}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{41}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{41}(t_p, t_p)) + F_{21}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{42}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{42}(t_p, t_p)) + \\ + F_{31}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{43}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{43}(t_p, t_p)) + F_{41}(t_p, t_p) (\text{Int}G_{44}(t_p, t_2) - \text{Int}G_{44}(t_p, t_p))$$

$$\Gamma_{42}(t_p, t_1, t_2)$$

- $t_2 \leq t_p$

$$\Gamma_{42}(t_p, t_1, t_2) = \text{Int}F_{42}(t_2) - \text{Int}F_{42}(t_1)$$

$$\begin{aligned}
& - t_1 > t_p \\
& \Gamma_{42}(t_p, t_1, t_2) = F_{22}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{42}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{42}(t_p, t_1)) + F_{32}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{43}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{43}(t_p, t_1)) \\
& \quad + \\
& \quad F_{42}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{44}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{44}(t_p, t_1))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - t_1 \leq t_p \text{ oraz } t_p < t_2 \\
& \Gamma_{42}(t_p, t_1, t_2) = \text{IntF}_{42}(t_p) - \text{IntF}_{42}(t_1) + F_{22}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{42}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{42}(t_p, t_p)) + \\
& \quad F_{32}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{43}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{43}(t_p, t_p)) + F_{42}(t_p, t_p) * (\text{IntG}_{44}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{44}(t_p, \\
& \quad t_p))
\end{aligned}$$

$$\Gamma_{43}(t_p, t_1, t_2)$$

$$\begin{aligned}
& - t_2 \leq t_p \\
& \Gamma_{43}(t_p, t_1, t_2) = \text{IntF}_{43}(t_2) - \text{IntF}_{43}(t_1) \\
& - t_1 > t_p \\
& \Gamma_{43}(t_p, t_1, t_2) = F_{33}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{43}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{43}(t_p, t_1)) + F_{43}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{44}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{44}(t_p, t_1))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - t_1 \leq t_p \text{ oraz } t_p < t_2 \\
& \Gamma_{43}(t_p, t_1, t_2) = \text{IntF}_{43}(t_p) - \text{IntF}_{43}(t_1) + F_{33}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{43}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{43}(t_p, t_p)) + \\
& \quad F_{43}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{44}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{44}(t_p, t_p))
\end{aligned}$$

$$\Gamma_{44}(t_p, t_1, t_2)$$

$$\begin{aligned}
& - t_2 \leq t_p \\
& \Gamma_{44}(t_p, t_1, t_2) = \text{IntF}_{44}(t_2) - \text{IntF}_{44}(t_1) \\
& - t_1 > t_p \\
& \Gamma_{44}(t_p, t_1, t_2) = F_{44}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{44}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{44}(t_p, t_1))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - t_1 \leq t_p \text{ oraz } t_p < t_2 \\
& \Gamma_{44}(t_p, t_1, t_2) = \text{IntF}_{44}(t_p) - \text{IntF}_{44}(t_1) + F_{44}(t_p, t_p) (\text{IntG}_{44}(t_p, t_2) - \text{IntG}_{44}(t_p, t_p))
\end{aligned}$$

## 2. Funkcje $F_{ij}(t, t_p)$

Wielkość  $t_p$  to czas pompowania, a  $t$  czas w stosunku do momentu rozpoczęcia pompowania. Jeżeli  $t \geq t_p$  to  $t=t_p$ .

$$F_{11}(t, t_p) = 1 - e^{-\lambda_1 t}$$

$$F_{21}(t, t_p) = 1 - \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t}$$

$$F_{22}(t, t_p) = 1 - e^{-\lambda_2 t}$$

$$F_{31}(t, t_p) = 1 - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} -$$

$$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t}$$

$$F_{32}(t, t_p) = 1 - \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t}$$

$$F_{33}(t, t_p) = 1 - e^{-\lambda_3 t}$$

$$F_{41}(t, t_p) = 1 - \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t}$$

$$- \frac{\lambda_1 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} -$$

$$\frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_4}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} - \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4 t}$$

$$F_{42}(t, t_p) = 1 - \frac{\lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2 \lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t}$$

$$- \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4 t}$$

$$F_{43}(t, t_p) = 1 - \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_4} e^{-\lambda_4 t}$$

$$F_{44}(t, t_p) = 1 - e^{-\lambda_4 t}$$

### 3. Funkcje Gij(t, t<sub>p</sub>)

Wielkość t<sub>p</sub> to czas pompowania, a t czas w stosunku do momentu rozpoczęcia pompowania.

$$G_{11}(t, t_p) = e^{-\lambda_1(t-t_p)}$$

$$G_{21}(t, t_p) = \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1(t-t_p)} + \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2(t-t_p)}$$

$$G_{22}(t, t_p) = e^{-\lambda_2(t-t_p)}$$

$$G_{31}(t, t_p) = \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1(t-t_p)} + \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2(t-t_p)} +$$

$$\frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3(t-t_p)}$$

$$G_{32}(t, t_p) = \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} e^{-\lambda_2(t-t_p)} + \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3(t-t_p)}$$

$$G_{33}(t, t_p) = e^{-\lambda_3(t-t_p)}$$

$$\begin{aligned}
G_{41}(t, t_p) &= \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1(t-t_p)} \\
&\quad + \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2(t-t_p)} + \\
&\quad \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3(t-t_p)} \\
&\quad + \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4(t-t_p)} \\
G_{42}(t, t_p) &= \frac{\lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2(t-t_p)} + \frac{\lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3(t-t_p)} + \\
&\quad \frac{\lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4(t-t_p)} \\
G_{43}(t, t_p) &= \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} e^{-\lambda_3(t-t_p)} + \frac{\lambda_4}{\lambda_3 - \lambda_4} e^{-\lambda_4(t-t_p)} \\
G_{44}(t, t_p) &= e^{-\lambda_4(t-t_p)}
\end{aligned}$$

#### 4. Funkcje IntFij(t)

Stosowane, jeśli  $t > t_p$ , gdzie  $t_p$  to czas pompowania powietrza przez filtr.

$$\begin{aligned}
IntF_{11}(t) &= t + \frac{1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \\
IntF_{21}(t) &= t + \frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} \\
IntF_{22}(t) &= t + \frac{1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} \\
IntF_{31}(t) &= t + \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} + \\
&\quad \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} \\
IntF_{32}(t) &= t + \frac{\lambda_3}{\lambda_2(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_2}{\lambda_3(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} \\
IntF_{33}(t) &= t + \frac{1}{\lambda_3} e^{-\lambda_3 t} \\
IntF_{41}(t) &= t + \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_3 \lambda_4}{\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} \\
&\quad + \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_4}{\lambda_3(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{\lambda_4(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4 t}
\end{aligned}$$

$$IntF_{42}(t) = t + \frac{\lambda_3\lambda_4}{\lambda_2(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_2\lambda_4}{\lambda_3(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} + \frac{\lambda_2\lambda_3}{\lambda_4(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4 t}$$

$$IntF_{43}(t) = t + \frac{\lambda_4}{\lambda_3(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} + \frac{\lambda_3}{\lambda_4(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4 t}$$

$$IntF_{44}(t) = t + \frac{1}{\lambda_4} e^{-\lambda_4 t}$$

## 5. Funkcje IntGij(t, t<sub>p</sub>)

Stosowane, jeśli  $t > t_p$ , gdzie  $t_p$  to czas pompowania powietrza przez filtr.

$$IntG_{11}(t) = -\frac{1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1(t-t_p)}$$

$$IntG_{21}(t) = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1(t-t_p)} - \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2(t-t_p)}$$

$$IntG_{22}(t) = -\frac{1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2(t-t_p)}$$

$$IntG_{31}(t) = -\frac{\lambda_2\lambda_3}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1(t-t_p)} - \frac{\lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2(t-t_p)} - \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3(t-t_p)}$$

$$IntG_{32}(t) = -\frac{\lambda_3}{\lambda_2(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2(t-t_p)} - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3(t-t_p)}$$

$$IntG_{33}(t) = -\frac{1}{\lambda_3} e^{-\lambda_3 t}$$

$$IntG_{41}(t) = -\frac{\lambda_2\lambda_3\lambda_4}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1(t-t_p)} - \frac{\lambda_3\lambda_4}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2(t-t_p)} - \frac{\lambda_2\lambda_4}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3(t-t_p)} - \frac{\lambda_2\lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4(t-t_p)}$$

$$IntG_{42}(t) = -\frac{\lambda_3\lambda_4}{\lambda_2(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2(t-t_p)} - \frac{\lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3(t-t_p)} - \frac{\lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} e^{-\lambda_4(t-t_p)}$$

$$IntG_{43}(t) = -\frac{\lambda_4}{\lambda_3(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} - \frac{1}{\lambda_3 - \lambda_4} e^{-\lambda_4 t}$$

$$IntG_{44}(t) = -\frac{1}{\lambda_4} e^{-\lambda_4(t-t_p)}$$