



GLÓWNY INSPEKTORAT SANITARNY



Dobre praktyki dotyczące sposobów pomiarów stężenia aktywności radonu w miejscach pracy, budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi

Warszawa, 2021 r.

Spis treści

1. Zdefiniowanie dobrych praktyk pomiarowych	3
2. Radon – podstawowe dane, oddziaływanie na organizm człowieka, pomiar	4
3. Regulacje prawne związane z występowaniem radonu w środowisku człowieka.....	6
4. Specyfika pomiarów wynikająca z miejsca pracy	10
4.1. Rekomendowane metody pomiarowe oraz ogólne zasady wykonywania pomiarów radonu	10
4.2. Pomiary stężeń aktywności radonu w miejscach pracy, budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi	11
4.3. Liczba detektorów, niezbędna do przeprowadzenia pomiarów rozpoznania narażenia na radon	13
4.4. Sprawozdania z pomiarów.....	14
4.5. Informacje uzupełniające.....	14
5. Pomiary stężenia aktywności radonu w wybranych miejscach pracy	15
5.1. Podziemne trasy turystyczne.....	15
5.2. Jaskinie i inne naturalne pustki w górotworze, które są miejscami pracy	18
speleologów, klimatologów, biologów, geologów i innych pracowników nauki.....	18
5.3. Ośrodki SPA oferujące różne formy subterranoterapii, tj. zabiegi wykonywane pod powierzchnią ziemi, np. w nieczynnych wyrobiskach górniczych.	20
5.4. Miejsca pracy związane z wydobywaniem ropy naftowej lub gazu ziemnego.....	22
5.5. Miejsca wydobywania rud metali.....	23
5.6. Podziemne parkingi, magazyny i stacje metra oraz w tunele (drogowe	25
i kolejowe i inne), jeśli są miejscem pracy.....	25
5.7. Miejsca pracy związane z uzdatnianiem wód podziemnych.	27
5.8. Sanatoria, wykorzystujące radon w celach leczniczych.	30
6. Podsumowanie	31
7. Literatura	32

1. Zdefiniowanie dobrych praktyk pomiarowych

Obecnie każdy kraj w różnych dziedzinach życia społecznego, gospodarczego czy politycznego wprowadza zasady dobrych praktyk.

Dobre praktyki pomiarowe to zbiór zasad i rekomendacji rzetelnego sposobu wykonywania pomiarów, zgodnie z wymaganiami prawnymi, najnowszą wiedzą i doświadczeniem specjalistów. Dobre praktyki pomiarowe cechuje powtarzalność, co daje możliwość ich zastosowania w podobnych warunkach w różnych miejscach i przez różne zespoły pomiarowe¹. Wykonywanie pomiarów zgodnie z dobrymi praktykami zapewnia możliwość porównania wyników pomiarów wykonywanych w różnych miejscach i przez różne zespoły pomiarowe.

Dobre praktyki to działania, które przynoszą konkretne, pozytywne rezultaty, zawierają w sobie pewien potencjał innowacji, są trwałe i powtarzalne, możliwe do zastosowania w podobnych warunkach w innym miejscu lub przez inne podmioty².

W przewodnikach NPL (National Physical Laboratory Wielka Brytania)³ zawarte jest 6 zasad dobrej praktyki pomiarowej.

Oto one:

1. Właściwe pomiary

Pomiary powinny być wykonywane po to, aby zaspokoić uzgodnione i prawidłowo określone wymagania.

2. Właściwe narzędzia

Pomiary powinny być wykonywane z wykorzystaniem narzędzi i metod, których przydatność do zamierzonego użycia jest możliwa do wykazania, a najlepiej kiedy jest optymalna w danym czasie.

3. Właściwi ludzie

Zespół wykonujący pomiary powinien być kompetentny, odpowiednio przeszkolony i dobrze poinformowany i w danym momencie w pełni zdolny do wykonania pomiaru.

4. Regularne przeglądy, testy i kalibrowanie

Wszystkie elementy procesu pomiarowego powinny być poddawane regularnym, niezależnym ocenom, przeglądom, testom i kalibracjom zarówno wewnętrznym jak i zewnętrznym.

5. Możliwa do wykazania spójność pomiarowa

Spójność pomiarowa, polegająca na powiązaniu wyniku pomiaru z przyjętymi układami odniesienia poprzez nieprzerwany łańcuch porównań. Spójność pomiarowa umożliwia porównywanie wyników pomiarów wykonywanych w różnych laboratoriach i w różnych warunkach

6. Właściwe procedury

Dobrze określone procedury spójne z narodowymi i międzynarodowymi standardami powinny być stosowane we wszystkich pomiarach.

Postępowanie według 6 powyższych zasad to absolutny fundament sposobów pomiarów stężenia aktywności radonu w miejscach pracy, budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi.

2. Radon – podstawowe dane, oddziaływanie na organizm człowieka, pomiar

Wśród występujących w przyrodzie pierwiastków są takie, które posiadają izotopy promieniotwórcze lub których wszystkie izotopy są promieniotwórcze. Ich charakterystyczną cechą jest samorzutny rozpad połączony z emisją energii w postaci cząstek i/lub promieniowania gamma. Do izotopów promieniotwórczych należą między innymi dwa ciężkie radionuklidy: uran (^{238}U) i tor (^{232}Th), które kolejno rozpadając się tworzą szeregi promieniotwórcze. Uran i tor oraz ich produkty rozpadu znajdują się we wszystkich składnikach geosfer: powietrzu atmosferycznym oraz znajdującym się w innych geosferach w postaci pyłu zawieszonego, a przede wszystkim w skałach i glebach tworzących litosferę, w wodach tworzących hydrosferę, a także w organizmach żywych tworzących biosferę. W szeregu promieniotwórczym uranu występuje rad (^{226}Ra) o okresie połowicznego rozpadu wynoszącym około 1600 lat.⁴ Podczas rozpadu radu (^{226}Ra) powstaje radon (^{222}Rn). Radon jest pierwiastkiem należącym do grupy helowców, czyli gazów szlachetnych. Przechodzi w stan ciekły w temperaturze -71°C , wrze w temperaturze $-61,8^{\circ}\text{C}$. Jest gazem niewidocznym, bez zapachu i smaku, dobrze rozpuszczalnym w wodzie i niektórych rozpuszczalnikach organicznych.⁵ Radon (^{222}Rn) ma

okres połowicznego rozpadu równy 3,8 dnia.⁶ Ze względu na gazowy stan skupienia i małą reaktywność chemiczną radon ma dużą samodzielność geochemiczną. Stosunkowo łatwo uwalnia się ze struktur minerałów, w których powstaje kosztem rozpadu ^{226}Ra , a względnie długi okres połowicznego rozpadu ^{222}Rn umożliwia mu wędrówkę w środowisku od miejsca powstania zarówno w strumieniu gazów, jak i wód do powietrza atmosferycznego, lub przestrzeni zamkniętych takich jak jaskinie, kopalnie, tunele i inne miejsca przeznaczone na stały pobyt ludzi. W wyniku ekshalacji radonu przedostaje się do powietrza atmosferycznego czy do powietrza dowolnych przestrzeni zamkniętych ustala się tam stężenie promieniotwórcze radonu (stężenie radonu), które najczęściej wyrażamy w jednostce Bqm^{-3} . Jeden bekerel (Bq) to 1 rozpad promieniotwórczy atomu w ciągu 1 sekundy. Radon uczestniczy w procesie oddychania człowieka i ze względu na swoje właściwości promieniotwórcze może mieć wpływ na jego zdrowie.

Radon podlega dalszemu procesowi rozpadu promieniotwórczego. W procesie tym powstają tzw. krótkożyciowe i długożyciowe produkty rozpadu radonu.

W powietrzu, krótkożyciowe produkty rozpadu ^{222}Rn , jak polon ^{218}Po , bizmut ^{214}Bi czy ołów ^{206}Pb łączą się z cząsteczkami pyłu tworząc tzw. aerozole promieniotwórcze.^{7,8,9,10}

Zdeponowane w układzie oddechowym aerozole promieniotwórcze ulegają rozpadowi, a emitowane promieniowanie jonizujące oddziałuje destrukcyjnie na tkanki. Różne komórki tego samego organizmu cechuje jednak różna wrażliwość na promieniowanie. Podstawową regułą, pozwalającą na oszacowanie wrażliwości komórek jest sformułowana w pierwszych latach zeszłego stulecia reguła Bergonie i Tribondeau, która głosi: "wrażliwość komórek na promieniowanie jest wprost proporcjonalna do ich aktywności proliferacyjnej a odwrotnie proporcjonalna do stopnia ich zróżnicowania"¹¹.

Skutki oddziaływania promieniowania na organizm dzielimy na deterministyczne (pojawiają się w przypadku otrzymania stosunkowo dużej dawki promieniowania, ich częstość i nasilenie wzrasta wraz z dawką promieniowania) i stochastyczne (nie ma dla nich dawki progowej, mogą się pojawić po otrzymaniu najmniejszej nawet dawki promieniowania).¹² Ze względu na specyfikę oddziaływania, radon i jego pochodne mogą wywoływać jedynie skutki somatyczno - stochastyczne (nowotwory płuc).

Dawka promieniowania jonizującego, jaką otrzymują komórki nabłonka płuc, skorelowana jest z ilością pochłoniętej przez te komórki energii cząstek alfa. Dlatego uważa się,

że właściwym kryterium oszacowania zagrożenia radiacyjnego jest ekspozycja na tzw. "energię potencjalną promieniowania alfa" produktów rozpadu radonu występujących w powietrzu.¹³

Promieniowanie jonizujące jest czynnikiem kancerogennym. Radon jest uznawany przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem¹⁴ (IARC) jako czynnik rakotwórczy klasy 1 (IARC, 2012)^{15,16}. Z zebranych na dużą skalę badań epidemiologicznych uzyskano dowody¹⁷, że istnieje liniowy związek między długoterminową ekspozycją na radon i ryzykiem występowania raka płuc. Według raportu WHO ekspozycja na radon jest drugą najważniejszą, po paleniu papierosów, przyczyną indukowania raka płuc.¹⁸

3. Regulacje prawne związane z występowaniem radonu w środowisku człowieka

Prawo - ogół przepisów i norm formalnie regulujących stosunki między ludźmi danej społeczności. Najwyższym aktem prawnym w Rzeczypospolitej Polskiej jest tzw. ustawa zasadnicza czyli Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej (Dz.U. 1997 nr 78 poz. 483). W artykule 66 Konstytucji zamieszczony jest zapis mówiący, iż każdy ma prawo do bezpiecznych i higienicznych warunków pracy oraz, że sposób realizacji tego prawa oraz obowiązki pracodawcy określa ustawa. Zapis odnosi się ogólnie do warunków pracy, natomiast w Kodeksie Pracy¹⁹ istnieją zapisy odnoszące się konkretnie do ochrony przed promieniowaniem jonizującym. I tak artykuł 223 stanowi, że pracodawca jest obowiązany chronić pracowników przed promieniowaniem jonizującym, pochodzącym ze źródeł sztucznych i naturalnych, występujących w środowisku pracy. Oraz, że dawka promieniowania jonizującego pochodzącego ze źródeł naturalnych, otrzymywana przez pracownika przy pracy w warunkach narażenia na to promieniowanie, nie może przekraczać dawek granicznych, określonych w odrębnych przepisach.

Ustawą, która w całości jest poświęcona narażeniu na promieniowanie jonizujące od promieniowania jonizującego jest Prawo atomowe²⁰, które dokonuje w zakresie swojej regulacji transpozycji m. in. DYREKTYWY RADY 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiającej podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz uchylająca dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 13/1 z dnia 17.1.2014)

Poniżej zamieszczone są niektóre zapisy umieszczone w ustawie Prawo atomowe dotyczące radonu.

Art. 23b. Ustala się poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu w:

- 1) miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń oraz
 - 2) pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi
- w wysokości 300 Bq/m³ (bekereli na metr sześcienny).

Art. 23c. 1. 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, o którym mowa w art. 23b,

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, o którym mowa w art. 23b

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

Ponadto, w myśl art. 23c ust. 2-6 ww. ustawy Prawo atomowe, kierownicy jednostek wykonujących działalność, w których występują miejsca pracy, o których mowa powyżej:

- zapewniają optymalizację narażenia pracowników wykonujących pracę w tych miejscach pracy oraz informują 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 przypadku gdy w miejscach pracy, o których mowa w pkt 1), wynik pomiaru wskazuje na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m³, kierownicy jednostek podejmują działania zapewniające ograniczenie narażenia pracowników na radon;
- w przypadku gdy w miejscach pracy, o których mowa w 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;

- pracowników wykonujących pracę w miejscach pracy, o których mowa powyżej, a którzy mogą być narażeni na otrzymanie dawki skutecznej (efektywnej) większej niż 6 mSv rocznie, kwalifikuje się jako pracowników kategorii A;
- pracowników wykonujących pracę w miejscach pracy, o których mowa w pkt 1), w których, mimo podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji, stężenie promieniotwórcze radonu przekracza poziom odniesienia 300 Bq/m³, 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 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 jako pracowników kategorii B.

W ślad za ustawą Prawo atomowe w dniu 30.06.2020 r. w Dzienniku Ustaw pod pozycją 1139 zostało opublikowane 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 odniesienia²¹ Powyższe rozporządzenie określa tereny, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia, o którym mowa w art. 23b ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (Dz. U. z 2021 r. poz. 1941.) tj. 300 Bq/m³ (bekereli na metr sześcienny).

W podziemnych zakładach górniczych system kontroli zagrożenia radiacyjnego został wdrożony na mocy ustawy Prawo atomowe i Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. z 2021 r. poz. 1420, z późn. zm.) oraz wynikających z nich przepisów wykonawczych.

Sposób prowadzenia kontroli zagrożenia, podejmowania działań zapobiegawczych oraz obowiązki i uprawnienia osób zaangażowanych w ten proces, określają rozporządzenia wykonawcze:

- Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz. U. z 2021 r. poz. 1617);
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. z 2017 r. poz. 1118).

Informacje uzupełniające

Największy wpływ na regulacje prawne w zakresie ochrony radiologicznej mają dwie pozarządowe międzynarodowe organizacje. Najważniejsza z nich to Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej ICRP (International Commission on Radiological Protection), organ doradczy WHO z siedzibą w Sutton (Wielka Brytania). ICRP, powołana do życia w 1928 r., skupia wielu wybitnych fachowców z całego świata, a zalecenia zawarte w publikacjach tej organizacji kształtują politykę i prawo w ochronie radiologicznej w większości krajów.

Drugą organizacją jest Międzynarodowa Komisja Radiologiczna ds. Jednostek i Pomiarów ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements), która powstała w 1925 roku z inicjatywy Międzynarodowego Kongresu Radiologii. Jej zadaniem jest ujednoczenie i upowszechnienie na skalę międzynarodową jednostek związanych z promieniowaniem i promieniotwórczością oraz związanych z nimi odpowiednich metod pomiarowych.

Duży wpływ na regulacje prawne mają również raporty publikowane przez IAEA, UNSCEAR oraz normy ISO, szczególnie seria norm ISO 11665

Zalecenia tych organizacji są publikowane w formie raportów, które stają się podstawą do opracowania prawa europejskiego, czy prawa krajów członkowskich. W ten sposób zalecenia zawarte w raportach ICRP (np. ICRP, 1991), znalazły swoje odzwierciedlenie w Dyrektywie Unii Europejskiej (EURATOM, 2013), a następnie w polskiej ustawie Prawo atomowe (Prawo Atomowe, 2000).

Na obecny kształt prawa polskiego związanego z radonem ma niewątpliwie wpływ DYREKTYWA RADY 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe

normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz uchylająca dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 13/1 z dnia 17.1.2014)

Duży wkład w obecny kształt Prawa atomowego miały również prace powołanego przez Ministra Środowiska Zespołu do spraw opracowania koncepcji wdrożenia do prawa polskiego

dyrektywy 2013/59/Euratom²²

Na opracowywanie niniejszego tekstu miała również wpływ organizacja pn. International Radon Measurement Association²³. IRMA International Industrial Guideline: Industrial radon measurement guideline to get an overall view of the radon concentration in workplace IRMA 0791-30, 27th of September 2017. (*Międzynarodowe Stowarzyszenie Pomiarów Radonu IRMA. Międzynarodowe Wytyczne Przemysłowe: Wytyczne dotyczące pomiarów radonu w przemyśle w celu uzyskania ogólnej wiedzy na temat stężenia radonu w miejscu pracy.*)

4. Specyfika pomiarów wynikająca z miejsca pracy

4.1. Rekomendowane metody pomiarowe oraz ogólne zasady wykonywania pomiarów radonu

Techniki pomiarowe służące do pomiaru stężenia aktywności radonu (^{222}Rn), energii potencjalnej promieniowania alfa produktów rozpadu ^{222}Rn lub obydwu tych parametrów wykorzystują najczęściej promieniowanie alfa emitowane podczas rozpadu ^{222}Rn i niektórych krótkożyciowych produktów jego rozpadu (polon ^{218}Po , ^{214}Po i ^{214}Bi).

W chwili obecnej do pomiarów stężeń radonu i/lub energii potencjalnej promieniowania alfa jego krótkożyciowych pochodnych stosuje się na świecie wiele przyrządów pomiarowych. Należą do nich między innymi: Atmos-12D, AlphaGUARD Pylon, EML Radometer, Sun Nuclear-1023 (radon) oraz Eberline WLM-14, Thom./Nielsen IRMP, Scintrex WLM-30, Alpha Nuclear-770A, SARAD, RAD-7 i inne²⁴ np. sondy SRDN-3 i 3a z detektorem półprzewodnikowym²⁵

W Polsce do pomiarów długoterminowe stężeń radonu zazwyczaj stosowane są komory dyfuzyjne z detektorem śladowym np. typu CR-39 (tzw. dozymetr pasywny).

Określenie "dozymetr pasywny" oznacza, że rejestracja promieniowania następuje w sposób bierny bez użycia wspomagających urządzeń mechanicznych, np. pomp powietrza

Metody pasywne - detektory śladowe muszą umożliwić wykonywanie pomiarów przez okres co najmniej 1 miesiąca (zgodnie z wymaganiami Ustawy Prawo atomowe art.47a). W celu uzyskania lepszej precyzji oszacowania wartości średniorocznego stężenia radonu, sugerowany

jest pomiar co najmniej 3-miesięczny (kwartalny), który odzwierciedla zmiany wynikające z trybu pracy i zmieniających się warunków zewnętrznych. Dopuszcza się stosowanie mierników aktywnych pod warunkiem, że zachowany będzie ciągły pomiar stężenia radonu w okresie co najmniej jednego miesiąca.

Detektory śladowe lub mierniki aktywne, na zlecenie pracodawcy, do czasu ukazania się odrębnych przepisów, dostarczają laboratoria posiadające certyfikat Polskiego Centrum Akredytacji (PCA) lub innej organizacji równorzędnej, lub uzyskały pozytywny rezultat w trakcie pomiarów porównawczych organizowanych przez Głównego Inspektora Sanitarnego.

Odczyt eksponowanych detektorów oraz analiza wyników pomiarów powinny być wykonywane przez laboratoria posiadające certyfikat Polskiego Centrum Akredytacji (PCA) lub innej organizacji równorzędnej lub laboratoria rekomendowane przez GIS w badaniach porównawczych. Do roku końca roku 2023 akceptowane będą laboratoria, które uzyskały pozytywny rezultat w trakcie pomiarów porównawczych organizowanych przez Głównego Inspektora Sanitarnego.

- Posiadają certyfikat akredytacji Polskiego Centrum Akredytacji (PCA) lub sygnatariuszy porozumień EA MLA i ILAC MRA dotyczących wzajemnego uznawania świadectw z badań
- Zostały dopuszczone do udziału w międzylaboratoryjnych pomiarach porównawczych organizowanych przez Głównego inspektora Sanitarnego i uzyskały wynik pozytywny.

Do udziału w międzylaboratoryjnych pomiarach porównawczych, Główny Inspektor Sanitarny dopuszcza laboratoria, które wykażą, na podstawie złożonych dokumentów, że posiadają system zapewnienia jakości wykonywanych badań, wyposażenie, warunki lokalowe i środowiskowe, zapewniające prawidłowość dokonywania pomiarów. Odmowa dopuszczenia do udziału w międzylaboratoryjnych pomiarach porównawczych następuje w drodze decyzji administracyjnej.

Od roku 2024 akceptowana będzie wyłącznie działalność laboratoriów, które posiadają certyfikat akredytacji Polskiego Centrum Akredytacji (PCA) lub sygnatariuszy porozumień EA MLA i ILAC MRA dotyczących wzajemnego uznawania świadectw z badań.

4.2. Pomiary stężeń aktywności radonu w miejscach pracy, budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi

Wartości stężenia radonu w badanych obiektach mogą ulegać znacznym wahaniom w zależności od m.in. pory roku, dnia/nocy, temperatury i ciśnienia atmosferycznego. Ważnym czynnikiem wpływającym na poziom stężenia radonu w pomieszczeniach jest sposób i intensywność ich wentylacji. W przypadku pomieszczeń i obiektów stanowiących miejsca pracy, wentylacja mechaniczna ma szczególne znaczenie, może bowiem powodować zarówno znaczne wzrosty, jak i spadki stężenia radonu. Często są sytuacje nierównomiernego rozkładu wartości stężenia aktywności radonu w różnych pomieszczeniach tego samego obiektu.

Z tego względu, w przypadku pomiarów wykonywanych po raz pierwszy w danym obiekcie, najlepszym i najbardziej racjonalnym rozwiązaniem, jest wykonanie pomiarów stężenia radonu we wszystkich pomieszczeniach, w których pracują pracownicy, bez względu na czas efektywnie przepracowany na danym stanowisku. Wyniki pomiarów umożliwią kierownikom jednostek realizację obowiązków ustawowych, zgodnie z zapisem w art. 23c ust. 2-6 ww. ustawy Prawo atomowe, przedstawionych powyżej w akapicie przedstawiającym dotyczącym aktualnego stanu prawnego.

Zaproponowane poniżej ogólne zasady prowadzenia pomiarów, w znacznej mierze są spójne z wytycznymi International Radon Measurement Association (IRMA).

Ogólne zasady prowadzenia pomiarów przedstawione poniżej mają zastosowanie do wszystkich miejsc pracy zlokalizowanych w budynkach, obiektach przemysłowych i inżynierskich oraz lokalach i wszelkiego rodzaju pomieszczeniach (przestrzeniach) przeznaczonych na pobyt ludzi.

- pomiary wykonywane są w pomieszczeniach/przestrzeniach, w których pracownicy pracują co najmniej 4 godziny dziennie;
- pomiary wykonywane są we wszystkich pomieszczeniach/przestrzeniach podziemnych/piwnicznych, w których możliwe jest ryzyko znaczącego wnikania radonu, a gdzie pracownicy przebywają co najmniej 50 godzin w ciągu roku to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia;

- w przypadku przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m^3 , kierownik jednostki podejmuje decyzję o rozszerzeniu pomiarów i wykonaniu ich we wszystkich pomieszczeniach, w których znajdują się miejsca pracy.
- w przypadku zmian warunków panujących w poszczególnych pomieszczeniach/przestrzeniach, wynikających na przykład ze zmiany warunków wentylacji lub ze zmian organizacji pracy, należy pomiary powtórzyć we wszystkich pomieszczeniach, w których znajdują się stanowiska pracy lub co najmniej w miejscach opisanych powyżej.

4.3 Liczba detektorów, niezbędna do przeprowadzenia pomiarów rozpoznania narażenia na radon

W pomieszczeniach i przestrzeniach zlokalizowanych w piwnicach, parterze i pod ziemią należy wykonywać pomiary zgodnie z następującą zasadą:

- 1 detektor należy umieścić w każdym pomieszczeniu/przestrzeni, w którym pracownicy pracują co najmniej 4 godziny dziennie;
- 1 detektor należy umieścić w każdym pomieszczeniu/przestrzeni podziemnej/piwnicznej, w których możliwe jest ryzyko znaczącego wnikania radonu, a gdzie pracownicy przebywają co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia;
Jeśli powierzchnia pomieszczeń/przestrzeni nie przekracza 150 m^2 należy rozmieścić co najmniej 1 detektor.

- Jeśli pomiary wykonywane są w pomieszczeniach/przestrzeniach o znacznej powierzchni, należy rozmieszczać co najmniej 1 detektor na każde 150 m^2 ;

Pomiarami należy objąć co najmniej 20% pomieszczeń na parterze w miejscach pracy, budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi

- W pomieszczeniach i powierzchniach powyżej parteru należy umieszczać co najmniej 1 detektor na 250 m^2 . (w przypadku możliwości wystąpienia dużych wartości stężeń powyżej parteru)

4.4. Sprawozdania z pomiarów

Sprawozdania z pomiarów wykonywanych w miejscach pracy powinny zawierać następujące informacje:

- nazwa i adres instytucji wykonującej pomiary,
- nazwa miejsca pracy (instytucji), w której wykonywano pomiary z następującymi informacjami:
 - rodzaj miejsca pracy,
 - informacja o wydajności systemu wentylacji, to jest liczba wymian powietrza na godzinę i innych warunkach technicznych, mogących mieć wpływ na poziom stężenia radonu,
 - okres wykonywania pomiarów,
 - rodzaj detektorów/ urządzeń pomiarowych,
 - wyniki pomiarów wraz z niepewnością pomiaru,
 - wartość średniorocznego stężenia aktywności radonu (^{222}Rn).

4.5. Informacje uzupełniające

1. Przed rozpoczęciem pomiarów wewnątrz budynków należy zidentyfikować miejsca potencjalnego/szczególnego wnikania radonu z podłoża gruntowego (skalnego) oraz miejsca wydostawania się radonu na zewnątrz, do atmosfery. Ponadto należy przeanalizować inne czynniki mające wpływ na migrację i wnikanie radonu, takie jak: lokalizacja szybów instalacyjnych, rodzaj stosowanej wentylacji, rodzaj materiałów budowlanych (zawartość nuklidów promieniotwórczych). Powyższa analiza pozwoli na zaplanowanie optymalnego rozmieszczenia detektorów.

2. Informacja o rozpoczęciu pomiarów radonu i miejscach umieszczania detektorów powinna być przekazana pracownikom przed rozpoczęciem kampanii pomiarowej. Pracownicy powinni być poinformowani o celu pomiarów.

3. Detektory powinny być umieszczone w bezpiecznych miejscach tak, aby ograniczyć do minimum możliwość ich przenoszenia, otwierania i innych działań mogących wpływać na wynik pomiaru. Jednocześnie miejsce pomiaru powinno być dobrane tak, aby wynik pomiaru był

reprezentatywny dla danego pomieszczenia. W miejscach pracy, budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi detektory należy umieszczać z dala od okien, grzejników, ciągów wentylacyjnych, możliwie najbliżej miejsc przebywających tam osób.

4. Należy zapewnić swobodny opływ powietrza wokół detektorów.

5. W trakcie pomiarów należy notować czas przebywania pracowników w pomieszczeniach, które nie są wykorzystywane w sposób ciągły (warsztaty, magazyny itp.).

Przedstawione powyżej zasady prowadzenia pomiarów zostaną uzupełnione poniżej z uwzględnieniem specyfiki konkretnych miejsc pracy.

5. Pomiary stężenia aktywności radonu w wybranych miejscach pracy

Powszechne występowanie gazowego pierwiastka promieniotwórczego, radonu w przyrodzie powoduje, iż może on stanowić zagrożenie dla zdrowia pracowników pracujących zarówno w podziemnych kopalniach, jak i w sklepie, czy warsztacie położonym na parterze. Poniżej przedstawione zostaną zalecenia dla konkretnych miejsc pracy.

5.1. Podziemne trasy turystyczne.

Podziemna trasa turystyczna to całość lub część obiektu podziemnego, powstałego w sposób naturalny lub w wyniku działalności człowieka, dostosowana do bezpiecznego ruchu turystycznego, posiadająca wartości przyrodnicze lub kulturowe oraz zorganizowaną obsługę turystów przez uprawniony do tego podmiot. Burzliwa historia Polski spowodowała, że jesteśmy krajem o niezwykle, najczęściej niedocenianym bogactwie i różnorodności obiektów podziemnych. Wiele z nich zostało udostępnionych do zwiedzania, stanowiąc wielką atrakcję turystyczną. Szacuje się, że w Polsce działa obecnie około 200 podziemnych tras turystycznych, w których może być zatrudnionych ponad 1,5 tys. osób.

Zagospodarowywanie podziemnych obiektów o naturalnym, jak i antropogenicznym pochodzeniu od wielu lat staje się nowym trendem dla urozmaicenia przestrzeni architektonicznej

i urbanistycznej. Adaptacja zarówno jaskiń, jak i coraz częściej starych podziemi dla wciąż rosnących potrzeb ludzi współczesnego świata rozwija się obecnie na niespotykaną jak dotąd skalę. Dzieje się tak za sprawą poszukiwania nowego sposobu na uatrakcyjnienie turystyki. Obiekt podziemny staje się w takim przypadku „dobrem turystycznym” przyciągającym uwagę turystów ze względu na swoje przyrodnicze, jak i antropogeniczne walory turystyczne.

W Polsce, jeszcze w 2009 roku funkcjonowało około 75 podziemnych tras turystycznych, ale do 2020 roku liczba ta wzrosła ponad dwukrotnie do około 200 obiektów. Większość spośród tych 200 podziemnych tras turystycznych można zwiedzać tylko i wyłącznie z przewodnikiem. Większość podziemnych tras turystycznych w Polsce znajduje się na obszarach o największych występujących w kraju koncentracjach radonu notowanych przede wszystkim w Sudetach, Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, Karpatach, Górach Świętokrzyskich oraz Wyżynie Lubelskiej.

Z uwagi na coraz większą popularność geoturystyki w świecie i w Polsce rośnie liczba osób zatrudnionych w turystycznych obiektach podziemnych, gdzie wykonują one swoje obowiązki w warunkach zawodowego narażenia na promieniowanie jonizujące. Źródłem tego promieniowania jest naturalny gaz promieniotwórczy radon i jego również promieniotwórcze pochodne (produkty rozpadu). Radon do przestrzeni jaskiń oraz wyrobisk podziemnych uwalniany jest z otaczających te obiekty skał.

Z występowaniem radonu w podziemnych trasach turystycznych związane są następujące aspekty:

1. Narażenie pracowników
2. Narażenie turystów
3. Uruchamianie nowych tras podziemnych
4. Obniżanie poziomu stężenia radonu

Generalnie podziemne trasy turystyczne można podzielić na trasy antropogeniczne (kopalnie, piwnice i inne budowle podziemne) oraz naturalne – jaskinie. Wielkość tras turystycznych jest również bardzo zróżnicowana od ogromnych, wielopoziomowych obiektów, jak np. kopalnia soli Wieliczka, czy niewielkich jak Jaskinia Głęboka²⁶.

Pomiary stężenia aktywności radonu należy wykonać na całej trasie turystycznej, szczególnie w miejscach gdzie zatrzymują się przewodnicy oraz w miejscach pracy w podziemiach np. sklepiki, tj. tam, gdzie pracownicy pracują co najmniej 4 godziny dziennie

Ponadto pomiary należy wykonać w miejscach, w których pracownicy przebywają co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia, na przykład: warsztaty techniczne, magazyny.

Zaleca się umieszczać detektory na wysokości od 1,5 do 2 metrów, w miejscu zabezpieczonym przed dostępem przypadkowych osób, w odległości co najmniej 20 cm od ściany w taki sposób, aby zapewnić swobodny opływ powietrza.

W celu oceny narażenia pracowników podziemnych tras turystycznych należy prowadzić ścisłą ewidencję czasu pracy w podziemiach.

Zaleca się, by przed uruchomieniem nowej trasy turystycznej dokonać oceny narażenia pracowników na radon. Dzięki temu możliwe jest takie zaprojektowanie trasy (sposobu jej wentylacji; odcięcia stref niebezpiecznych; usytuowania punktów dłuższego pobytu, itd.), aby zminimalizować ryzyko związane z narażeniem na promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu i produktów jego rozpadu przede wszystkim przewodników turystycznych i pracowników obsługi technicznej obiektu, a w wyjątkowych obiektach także turystów.

Specyfika podziemnych tras turystycznych powoduje, iż obniżenie wysokiego poziomu stężenia radonu nie zawsze jest możliwe do zrealizowania. Obniżyć poziom stężenia radonu można poprzez zwiększenie intensywności wentylacji lub zmianę jej kierunku oraz poprzez izolowanie miejsc, z których radon przedostaje się do trasy turystycznej. Zaleca się w pierwszej kolejności zintensyfikowanie wentylacji naturalnej poprzez udrożnienie systemu wyrobisk, a w dalszej kolejności zastosowanie lub zwiększenie wydajności wentylacji mechanicznej, co jest rozwiązaniem zawsze droższym. W przypadku tras turystycznych w obiektach naturalnych – jaskiniach zwiększenie intensywności wentylacji (także naturalnej) może ~~to~~ naruszyć ekosystem trasy i ją zniszczyć (najczęściej związane jest to ze zmianami naturalnej wilgotności względnej). W przypadku tras antropogenicznych jest to możliwe do przeprowadzenia.

Ze względu na stosunkowo krótki czas przebywania turystów w podziemnych trasach

turystycznych wpływ radonu na ich organizm jest zwykle do pominięcia (może być istotny np. w udostępnionych nieczynnych kopalniach uranu lub kopalniach niektórych rud metali).

W przypadku zmian warunków panujących w trasach takich jak uruchomienie nowych miejsc do zwiedzania, zmiany warunków wentylacji lub ze zmian organizacji pracy, należy pomiary powtórzyć we wszystkich miejscach, w których znajdują się stanowiska pracy.

5.2. Jaskinie i inne naturalne pustki w górotworze, które są miejscami pracy speleologów, klimatologów, biologów, geologów i innych pracowników nauki.

Powszechnie stosowana definicja jaskini określa ją jako naturalną pustą przestrzeń w skale, o rozmiarach umożliwiających jej penetrację przez człowieka. Jaskinie to na ogół systemy próżni i kanałów podziemnych, tworzących się przez miliony lat, w wyniku różnych procesów geologicznych. Jaskinie będące przedmiotem badań naukowców są zróżnicowane. Niektóre z nich są nieduże, horyzontalne, inne mają charakter szczelin, korytarzy rurowych, meandrów charakterystycznych dla warunków cyrkulacji grawitacyjnej, czy wypełnionych osadami namulisk i zawalisk.

Wyniki badań prowadzonych od ponad 50-ciu lat pokazały, że narażenie radiacyjne powodowane przez radon, związane jest przede wszystkim z zamkniętymi przestrzeniami o słabej wentylacji, jakimi są między innymi wyrobiska podziemnych zakładów górniczych, tunele, domy mieszkalne, a także jaskinie. Na kształtowanie się rozkładu stężeń radonu w jaskiniach wpływa wiele czynników, takich jak prędkość przepływu powietrza w ich różnych partiach zależna od morfologii korytarzy i sal, ograniczenia ruchu powietrza w odciętych salach i komorach, stopień spękania górotworu, odległość od dużych stref dyslokacyjnych drożnych dla gazów oraz zawartość macierzystego ^{226}Ra w skałach bezpośredniego sąsiedztwa jaskini oraz charakter (struktura) materiału klastycznego (namulisk, aluwiów, materiału z obrywów, zawalisk i in.) wypełniającego jaskinie oraz koncentracja zawartego w tym materiale ^{226}Ra . Najważniejszym czynnikiem powodującym zmiany w czasie i w przestrzeni stężenia aktywności ^{222}Rn jest wentylacja obiektu, zależna przede wszystkim od połączenia jaskini z atmosferą. Wymiana powietrza pomiędzy jaskinią a atmosferą może być naturalna (najczęściej grawitacyjna) lub wymuszona (najczęściej mechanicznymi wentylatorami). Czynnikiem uruchamiającym naturalnej wymiany powietrza jaskini z atmosferą są przede wszystkim istniejące gradienty ciśnienia i/lub temperatury, które dodatkowo mogą być wspomagane przez wiatry

wiejące w kierunku otworów wejściowych.^{27,28,29}. Wyniki badań prowadzonych w jaskiniach, opisane w licznych artykułach naukowych, jednoznacznie pokazują, że w niektórych z nich mierzone są duże wartości stężenia radonu, sięgające dziesiątek tysięcy bekereli w metrze sześciennym (Bq/m^3). Można więc przypuszczać, że w specyficznych przypadkach, obciążające dawki skuteczne, powodowane ekspozycją na radon, na jakie mogą być narażeni speleolodzy, pracownicy nauki prowadzący badania i przewodnicy w jaskiniach turystycznych, przekraczają wartości dopuszczalne dla ogółu ludności, a nawet dla pracowników. Dlatego w miejscach pracy speleologów, klimatologów, biologów i innych pracowników nauki, zlokalizowanych w jaskiniach, należy wykonywać rutynowe pomiary stężenia radonu w celu oszacowania rzeczywistych obciążających dawek skutecznych, na jakie mogą być oni narażeni.

Pomiar stężenia radonu należy wykonać każdorazowo przed rozpoczęciem pracy speleologów, klimatologów, biologów i innych pracowników nauki na nowych stanowiskach pracy.

W przypadku rozpoczęcia penetracji lub badań nowej jaskini zaleca się przeprowadzenie chwilowych pomiarów stężenia aktywności radonu (^{222}Rn) w celu określania stopnia narażenia osób badających jaskinię, a następnie prowadzących w niej obserwacje i pomiary naukowe.

Rutynowe pomiary radonu należy wykonywać zgodnie z poniższymi zaleceniami.

Pomiary powinny być wykonywane na stanowiskach pracy speleologów, klimatologów, biologów, geologów i innych pracowników nauki, gdzie przebywają co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia. Pomiarami powinny zostać objęte stanowiska, na których ryzyko wystąpienia wysokich wartości stężeń radonu jest szczególnie duże, np. komory oddalone od prądów powietrza, przestrzenie odizolowane bez względu na czas przepracowany na takich stanowiskach. Pomiary należy wykonywać bezwzględnie w obiektach penetrowanych po raz pierwszy (nowo odkrywanych), ze względu na możliwość istnienia partii korytarzy niemal zupełnie odizolowanych od wpływu atmosfery, a więc potencjalnie mogących zawierać ekstremalnie duże koncentracje radonu.

Zaleca się umieszczać detektory na wysokości od 1,5 do 2 m, w miejscu zabezpieczonym przed dostępem przypadkowych osób, w odległości co najmniej 20 cm od ściany (ociosów) oraz

spągu i stropu (jeśli to możliwe z uwagi na morfologię korytarzy) w taki sposób, aby zapewnić swobodny opływ powietrza.

5.3. Ośrodki SPA oferujące różne formy subterranoterapii, tj. zabiegi wykonywane pod powierzchnią ziemi, np. w nieczynnych wyrobiskach górniczych.

Do tej klasy obiektów zaliczyć należy ośrodki oferujące zabiegi lecznicze, jak i inne zabiegi terapeutyczne, relaksacyjne itp., oferujące różne formy subterranoterapii, tj. zabiegi wykonywane pod powierzchnią ziemi, np. w nieczynnych wyrobiskach górniczych i jaskiniach, ale także takie obiekty, które do tych zabiegów wykorzystują wody radonowe, powietrze wzbogacone w radon (np. powietrze glebowe) lub wody o dużej mineralizacji (solanki), czy też wody termalne, które mogą zawierać zwiększone koncentracje $^{226}\text{Ra}^{30}$.

Specyficzne właściwości lecznicze przestrzeni podziemnych, takich jak grotty, jaskinie, sztolnie i inne nieczynne wyrobiska górnicze, mogą być wykorzystane w terapii różnych chorób. Terapia, nosząca nazwę, subterranoterapii, polega na poddawaniu ludzi cierpiących głównie na choroby układu oddechowego, oddziaływaniu mikroklimatu przestrzeni podziemnych. Mikroklimat każdego podziemnego SPA tworzą specyficzne warunki biologiczne, fizyczne i chemiczne powietrza podziemnych przestrzeni.

Pierwszy polski ośrodek subterranoterapii stworzono w połowie ubiegłego wieku w kopalni soli w Wieliczce. Pobyt na głębokości ponad 100 metrów pod ziemią, gdzie w powietrzu koncentracje bakterii, zanieczyszczeń i wirusów są minimalne, działa korzystnie na schorzenia układu oddechowego, dolegliwości alergiczne, a ponadto pozytywnie wpływa na kondycję całego organizmu. Kolejne podziemne uzdrowisko w wyrobiskach solnych powstało w kopalni soli w Bochni.

Podziemne Inhalatoria Radonowe, to ośrodki subterranoterapii, wykorzystujące specyficzny podziemny mikroklimat z chłodnym i wilgotnym powietrzem, wolny od zanieczyszczeń i alergenów oraz zawierający radon w powietrzu. Ośrodki tego typu działają na Dolnym Śląsku w podziemnych sztolniach powyrobiskowych, w nieczynnych kopalniach rud uranu.

Wszystkie ośrodki subterranoterapii łączy ważna cecha: są zlokalizowane w zamkniętych przestrzeniach o ograniczonej wentylacji. Narażenie radiacyjne powodowane przez radon,

związane jest przede wszystkim z zamkniętymi przestrzeniami, co oznacza, że pracownicy obsługujący miejsca pracy pod ziemią, mogą być narażeni na otrzymanie podwyższonej obciążającej dawki skutecznej, w wyniku ekspozycji na radon i produkty jego rozpadu.

Podobne warunki występowania zwiększonej koncentracji radonu mogą istnieć w SPA stosujących w zabiegach wody radonowe lub powietrze wzbogacone w radon, a także w SPA stosujących wody o dużej mineralizacji, zwłaszcza solanki oraz wody termalne, gdyż niektóre z tych wód zawierają znacznie zwiększone koncentracje izotopów radu, przede wszystkim ^{226}Ra ³¹.

Pomiary stężenia radonu powinny być wykonywane we wszystkich miejscach, w których znajdują się stanowiska pracy oraz w pomieszczeniach (komorach), w których przygotowywane i wykonywane są zabiegi. Jeśli ich powierzchnia nie przekracza 150 m², należy wykonać pomiar w co najmniej w 1 punkcie, np. na stanowisku kontroli zabiegów. Jeśli powierzchnia komory (pomieszczenia) jest znaczna, należy rozmieszczać co najmniej po 1 detektorze na każde 150 m².

W przypadku miejsc pracy usytuowanych na powierzchni, takich jak budynki biurowe, sklepy z pamiątkami i in., w przypadku konieczności ograniczenia liczby pomiarów, detektory radonu należy obowiązkowo umieszczać w miejscach stałej pracy, takich jak np. sklepy z pamiątkami i in. pomieszczeniach (tj. tam, gdzie pracownicy pracują co najmniej 4 godziny dziennie);

- W miejscach pracy usytuowanych pod ziemią, w których pracownicy przebywają co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia, na przykład: warsztaty i pomieszczenia techniczne, magazyny;
- Detektory należy umieszczać na wysokości strefy oddychania, w miejscu zabezpieczonym przed dostępem przypadkowych osób, w odległości co najmniej 20 cm od ściany w taki sposób, aby zapewnić swobodny dostęp powietrza.

W przypadku zmian warunków panujących w poszczególnych pomieszczeniach (przestrzeniach), wynikających na przykład ze zmiany warunków wentylacji lub ze zmian organizacji pracy, należy pomiary powtórzyć we wszystkich pomieszczeniach, w których

znajdują się stanowiska pracy lub co najmniej w miejscach opisanych powyżej.

5.4. Miejsca pracy związane z wydobywaniem ropy naftowej lub gazu ziemnego

Miejsca wydobywania ropy naftowej lub gazu ziemnego - wiertnie – to kompleks urządzeń i zabudowań otaczających wieżę wiertniczą. Współczesne urządzenia wiertnicze, zainstalowana w wieży wiertniczej, umożliwiają wykonywanie otworów wiertniczych do głębokości ponad 10 000 metrów. Infrastruktura wiertni, to szereg budynków biurowych, laboratoryjnych i technicznych, takich jak rozdzielnie, maszynownie, czy warsztaty. Poza zabudowaniami niezbędnymi do realizacji wiercenia i wydobywania otworowego ropy i gazu, są instalacje takie jak zbiorniki płuczkowe, pompy płuczki, rurociągi, stanowiska gromadzenia odpadów itp. Ważne są także instalacje służące do pompowania, gromadzenia lub zatłaczania innych płynów złożowych, jak np. wód podziemnych, w tym zwłaszcza solanek, które mogą zawierać bardzo duże koncentracje radu, w tym ^{226}Ra , co wynika z ich charakterystyki geochemicznej..

W trakcie wydobywania, transportu i magazynowania ropy naftowej i gazu ziemnego oraz innych płynów złożowych (solanek), naturalne nuklidy promieniotwórcze, obecne w różnych koncentracjach we wszystkich warstwach skorupy ziemskiej, towarzyszące konwencjonalnym i niekonwencjonalnym złożom węglowodorów, wydobywane są na powierzchnię i mogą kumulować się na różnych etapach procesu technologicznego. Kopalnia otworowa to specyficzny rodzaj zakładu górniczego, zatrudniający wieloosobową załogę. Należy mieć świadomość, że specyficzne warunki miejsca pracy, mogą powodować narażenie radiacyjne załogi wiertni, a także innych miejsc pracy związanych z magazynowaniem, przeróbką i dystrybucją tych kopalin. Potencjalne zagrożenie radiacyjne pracowników może być spowodowane obecnością odpadów o podwyższonej promieniotwórczości - ekspozycja na promieniowanie gamma. Innym źródłem zagrożenia może być radon, przedostający się z głębszych poziomów skorupy ziemskiej w procesie wiercenia i wydobywania ropy naftowej i gazu, obecny w powietrzu na różnych stanowiskach pracy. Źródłem radonu i produktów jego rozpadu mogą być odpady, wody

procesowe oraz związki osadzające się wewnątrz rur transportujących ropę naftową, gaz ziemny i inne płyny złożowe (np. solanki).

Pomiary stężenia radonu powinny być wykonywane we wszystkich miejscach, w których znajdują się stanowiska pracy.

W przypadku konieczności ograniczenia liczby pomiarów, badaniami powinny być objęte:

- Miejsca pracy obsługi wiertni oraz miejsca pracy pracowników utrzymania ruchu, szczególnie w lokalizacjach transportu gazu/ropy naftowej rurociągiem na powierzchni i wszelkich zbiorników, przepompowni, etc. Detektory powinny zostać rozmieszczone w strefach oddychania, tj na wysokości od 1 do 1,5 m, w sposób zapewniający swobodny opływ powietrza wokół detektorów;
- Miejsca pracy nie wymienione wyżej, np. przy odkrytych składowiskach odpadów wydobywczych, gdzie pracownicy pracują co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia. Detektory powinny zostać rozmieszczone na wysokości strefy oddychania, w sposób zapewniający swobodny opływ powietrza wokół detektorów.
- Pomieszczenia biurowe (biuro geologa, pomieszczenia dla wiertników, rdzeniownia, biuro inwestora i inne), zgodnie z ogólnymi wymaganiami pomiarów w miejscach pracy.
- Inne pomieszczenia, w których pracownicy przebywają co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia, w których możliwe jest ryzyko znaczącego wnikania radonu, takie jak: tłocznie, magazyny techniczne, warsztaty, laboratoria płuczkowe, laboratoria badawcze, rdzeniownie i inne, zlokalizowane w odległości do 100 m od wieży wiertniczej;

5.5. Miejsca wydobywania rud metali

Narażenie radiacyjne, powodowane przez radon związane jest przede wszystkim z zamkniętymi przestrzeniami o słabej wentylacji. Tak więc miejscami szczególnie zagrożonymi

promieniowaniem jonizującym są podziemne kopalnie, głównie rud uranu i metali kolorowych, a także węgla kamiennego.

Problem występowania narażenia radiacyjnego w kopalniach uranu interesował uczonych już od ponad pięćdziesięciu lat. W latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia wykazano, że przyczyną zwiększonego ryzyka zachorowania na raka płuc nie jest sam radon, lecz krótkożyciowe produkty jego rozpadu, osiadające w płucach i drogach oddechowych. Od ponad pół wieku prowadzono kontrolę narażenia radiacyjnego górników kopalń uranowych. Natomiast pomijano lub zaniedbywano to zagrożenie w kopalniach nieuranowych i budynkach mieszkalnych. Przez ostatnie trzydzieści lat poglądy uległy jednak zmianie zarówno w odniesieniu do kopalń, jak i budynków mieszkalnych. Ważnym dokumentem przedstawiającym dane na temat zachorowalności górników był raport BEIR VI³², ogłoszony przez amerykański Komitet Badań Naukowych (National Research Council). Autorzy raportu przeanalizowali zachorowalność grupy 60 000 górników pracujących w latach 1941-1990 w różnego typu kopalniach w 8 krajach. Okazało się, że zachorowania na raka płuc stwierdzono u 2600 górników, podczas, gdy model teoretyczny wskazywał, że w badanej grupie można się spodziewać 750 zachorowań.

Problemem narażenia radiacyjnego w polskich kopalniach węgla kamiennego zajmowano się już w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Badania narażenia radiacyjnego w polskich kopalniach wykazały, że stężenie energii potencjalnej promieniowania

alfa od pochodnych radonu w powietrzu kopalnianym może niekiedy być bardzo duże i osiągać wartość do kilkudziesięciu $\mu\text{J}/\text{m}^3$. Wartości dawki, na jakie mogą być narażeni górnicy, a także pracownicy zakładów przeróbczych, w specyficznych warunkach, przekraczają dopuszczalne limity.

Ze względu na specyficzne warunki klimatyczne panujące w kopalniach, a w szczególności wyłączenie stosowanie wentylacji mechanicznej nie należy prowadzić pomiarów stężenia promieniotwórczego radonu za pomocą dozymetrów pasywnych rozmieszczonych w wyrobiskach kopalnianych, ze względu na możliwość znacznego zawyżenia wyników. (Ze względu na mocno rozbudowany system wentylacyjny istnieje możliwość wyłączania części wentylacji w okresach spadku intensywności wydobywania – weekendy, święta i inne przerwy w pracy)

Kopalnie rud miedzi są to obiekty podziemne o rozległej strukturze zarówno poziomej jak i pionowej. W celu dokonania oszacowania średniorocznego pomiaru stężenia radonu w wyrobiskach należy wykonać pomiary w różnych rejonach wentylacyjnych. Liczba dozymetrów określona zostanie przez służby wentylacyjne kopalni, ale nie powinna być mniejsza niż 30 dozymetrów. Przesłane dozymetry należy rozdzielić wśród górników w sposób reprezentatywny, tak aby pomiarami objąć całą kopalnię. Oznacza to, że dozymetry należy podzielić proporcjonalnie do liczby górników pracujących w rejonach, na stanowiskach itp. Dozymetry tła (dołączone do dozymetrów pomiarowych) należy umieścić w miejscach przechowywania dozymetrów po zakończeniu pracy przez górników (łąźnie, szatnie, lampownie itp.).

Dozymetry te powinny być umieszczone przez cały okres ekspozycji (tzn. od daty początku okresu ekspozycji do daty końca okresu ekspozycji włącznie). Okres ekspozycji dozymetru wynosi minimum jeden miesiąc. W danym okresie ekspozycji jednemu górnikowi należy przydzielić tylko jeden dozymetr. Przy odsyłaniu dozymetrów ważne jest podanie okresu ekspozycji i rzeczywisty czas pracy górnika oraz czas ekspozycji tła. W przypadku kopalni podziemnych należy także monitorować uwalnianie się radonu z miejsc dopływu do wyrobisk oraz ze zbiorników (rząpi) i systemów przesyłowych pompowanych wód kopalnianych, zwłaszcza solanek i wód termalnych lub o podwyższonej temperaturze.

5.6. Podziemne parkingi, magazyny i stacje metra oraz w tunele (drogowe i kolejowe i inne), jeśli są miejscem pracy.

Narażenie radiacyjne powodowane przez radon, związane jest przede wszystkim z zamkniętymi przestrzeniami o słabej wentylacji, jakimi są między innymi wyrobiska podziemnych zakładów górniczych, domy mieszkalne, jaskinie, a także podziemne parkingi, magazyny, stacje metra, tunele. O ile w przypadku na przykład górnictwa podziemnego, badania radonu, a szczególnie produktów jego rozpadu, wykonywane są w Polsce od prawie 50 lat i problem narażenia radiacyjnego przebił się do świadomości tej grupy pracowników, o tyle potrzeba ochrony przed naturalnym promieniowaniem jonizującym pracowników innych miejsc pracy pod ziemią, wciąż nie jest oczywista. Warunki pracy w miejscach pracy pod ziemią, takich jak podziemne parkingi, magazyny, stacje metra, tunele, w tym podziemne linie przesyłowe informacji lub mediów – studzienki i tunele telekomunikacyjne, przesyłu gazu, wody, kanalizacji

deszczowej i sanitarnej, jeżeli wymagają obsługi przez ludzi, można porównać do warunków pracy w podziemnych wyrobiskach kopalń, stanowisk badawczych w jaskiniach, czy w podziemnych trasach turystycznych. Są to przestrzenie i korytarze, obudowane materiałami budowlanymi, a czasami, w pewnych odcinkach, otoczone skałami górotworu. Źródłem radonu mogą być materiały budowlane lub otaczające utwory geologiczne. Należy pamiętać, że promieniotwórczy gaz radon, może przenikać do pomieszczeń w wyniku procesów fizycznych z każdego rodzaju skał i materiałów budowlanych. W przypadku słabej wentylacji, stężenie radonu w pomieszczeniach i przestrzeniach może być bardzo duże, niezależnie od koncentracji naturalnych nuklidów promieniotwórczych w materiałach budowlanych i skałach otaczających. Oznacza to, że pracownicy obsługujący miejsca pracy pod ziemią, mogą być narażeni na otrzymanie zwiększonej obciążającej dawki skutecznej w wyniku ekspozycji na radon i produkty jego rozpadu.

Pomiary stężenia radonu powinny być wykonywane we wszystkich miejscach, w których znajdują się stanowiska pracy.

W przypadku konieczności ograniczenia liczby pomiarów, badaniami powinny być objęte:

- Pomieszczenia/przestrzenie, w których pracownicy pracują co najmniej 4 godziny dziennie;
- Miejsca pracy, w których możliwe jest ryzyko znaczącego wnikania radonu, a gdzie pracownicy pracują co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia, takie jak magazyny, tunele, studzienki rewizyjne, pomieszczenia techniczne i in.;
- W przypadku, jeśli powierzchnia parkingu/magazynu/stacji metra/tunelu nie przekracza 150 m², wykonujemy pomiar w co najmniej 1 punkcie. Jeśli powierzchnia badanego obiektu jest znaczna, należy rozmieszczać co najmniej po 1 detektorze na każde 150 m²;
- Zaleca się rozmieszczać na wysokości 1,5 do 2 m, w miejscu zabezpieczonym przed dostępem przypadkowych osób, w odległości co najmniej 20 cm od ściany w taki sposób, aby zapewnić swobodny opływ powietrza

W przypadku zmian warunków panujących w poszczególnych pomieszczeniach (przestrzeniach), wynikających na przykład ze zmiany warunków wentylacji lub ze zmian organizacji pracy, należy pomiary powtórzyć we wszystkich pomieszczeniach, w których znajdują się stanowiska pracy lub co najmniej w miejscach opisanych powyżej

5.7. Miejsca pracy związane z uzdatnianiem wód podziemnych.

5.7.1. Stacje uzdatniania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, w których w wyniku przeprowadzonych pomiarów stężenia radonu na ujęciu stwierdzono w wodzie przekraczanie wartości parametrycznej określonej w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, tj. 100 Bq/l.

5.7.2. Stacje uzdatniania wody wykorzystywanej na pływalniach, w Aquaparkach, itp. obiektach, jeżeli woda doprowadzana na pływalnię nie jest wodą przeznaczoną do spożycia przez ludzi.

Wody podziemne dzięki swym parametrom fizycznym i składowi chemicznemu, nadają się szczególnie dla celów wodociągowych. Wody podziemne znajdują się w warstwach wodonośnych (zbiorniki porowe i szczelinowo-porowe w skałach osadowych), lub w zbiornikach szczelinowych (zwykle w skałach krystalicznych), często przykrytych nieprzepuszczalnymi warstwami skał. Głębokość zalegania wód podziemnych może sięgać kilkuset metrów. Na ogół wody te mają stałą temperaturę, ponadto odznaczają się stałymi parametrami fizykochemicznymi. Skład chemiczny wód podziemnych zależy od rodzaju utworów geologicznych (skał zbiornikowych), budujących warstwę wodonośną (zbiornik wód podziemnych). Wody podziemne przed skierowaniem ich do miejskich sieci wodociągowych, muszą być poddane procesowi uzdatniania. Celem uzdatniania jest doprowadzenie wody pompowanej z podziemnych warstw wodonośnych do stanu czystości wymaganego dla określonego zastosowania. Proces uzdatniania wody prowadzony jest w stacji uzdatniania wody. Stacje uzdatniania wody wyposażone są w urządzenia i instalacje, konieczne do usunięcia zanieczyszczeń chemicznych, mechanicznych i biologicznych. Główne etapy oczyszczania

i uzdatniania wód zależące od specyficznych potrzeb. Są to między innymi odżelazianie, zmiękczenie, destylowanie, filtracja, ozonowanie, chlorowanie i inne sposoby dezynfekcji oraz aeracja (napowietrzenie).

Poszczególne etapy technologiczne procesu uzdatniania wód obsługiwane są przez wykwalifikowanych pracowników.

Wody podziemne niejednokrotnie zawierają zwiększone zawartości naturalnych nuklidów promieniotwórczych z szeregu uranowego i torowego. Izotopy radu mogą być wytrącane w procesie chemicznym na systemie filtrów. Jednym z elementów łańcucha promieniotwórczego jest radon, promieniotwórczy gaz szlachetny. Radon transportowany jest wraz z wodą i może uwalniać się z wody do powietrza na różnych etapach procesu oczyszczania i uzdatniania wody. Proces przechodzenia radonu z wody do powietrza szczególnie intensywnie zachodzi na stanowisku aeracji, w odstojnikach i zbiornikach.

Niejednokrotnie uzdatnione wody podziemne wykorzystywane są na pływalniach i basenach. Tutaj emisja radonu jest szczególnie intensywna, spotęgowana podgrzewaniem, napowietrzaniem, mieszaniem i rozpryskiwaniem wody. Duża powierzchnia basenów również ma wpływ na poziom stężenia radonu w pomieszczeniu pływalni. Im większa jest kubatura pomieszczeń z basenami, systemami jacuzzi, itp., tym mniejsze będzie stężenie radonu. Podobnie, im więcej wody podlega recyklingowi, tym mniejsze jest stężenie radonu, co oznacza, że każdorazowe dopompowanie „świeżo” ujętej wody podziemnej powoduje zwiększenie stężenia radonu uwolnionego z wody do powietrza pomieszczeń basenowych.

W związku z możliwością wystąpienia zwiększonych wartości stężeń aktywności radonu (^{222}Rn) w powietrzu na różnych stanowiskach pracy w stacjach uzdatniania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi i wody wykorzystywanej na pływalniach, w basenach, aquaparkach, itp. pracownicy takich obiektów mogą być narażeni na otrzymanie podwyższonych obciążających dawek skutecznych od radonu i produktów jego rozpadu. Dlatego należy wykonać pomiary stężenia radonu w miejscach pracy, a w przypadku stwierdzenia możliwości przekroczenia wartości 300 Bq/m^3 , należy podjąć działania, mające na celu obniżenie stężenia tego nuklidu w powietrzu.

Pomiary stężenia radonu powinny być wykonywane we wszystkich miejscach, w których znajdują się stanowiska pracy. W przypadku konieczności ograniczenia liczby pomiarów, badaniami powinny być objęte:

- Miejsca pracy znajdujące się w stacjach filtrów, aeratorów, sprężarek, hydroforniach, pomieszczeniach, w których znajdują się zbiorniki (zwłaszcza otwarte) i w innych lokalizacjach elementów technologicznych, funkcjonujących w przestrzeni zamkniętej – bez względu na czas efektywnie przepracowany na danym stanowisku;
- Miejsca pracy nie wymienione powyżej, w których możliwe jest wystąpienie ryzyka znaczącego przenikania radonu do powietrza, a gdzie pracownicy pracują co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia;
- Baseny i zbiorniki wody w przestrzeniach zamkniętych – w takich miejscach należy rozmieszczać co najmniej 1 detektor na 150 m²;
- Pomieszczenia biurowe, pomieszczenia techniczne i inne, w których pracownicy pracują co najmniej 4 godziny dziennie, zgodnie z ogólnymi wymaganiami pomiarów w miejscach pracy;
- Detektory należy umieszczać na wysokości strefy oddychania, w miejscu zabezpieczonym przed dostępem przypadkowych osób, w odległości co najmniej 20 cm od ściany w taki sposób, aby zapewnić swobodny dostęp powietrza;
- W przypadku zmian warunków panujących w poszczególnych pomieszczeniach/przestrzeniach, wynikających na przykład ze zmiany warunków wentylacji lub ze zmian organizacji pracy, należy pomiary powtórzyć we wszystkich pomieszczeniach, w których znajdują się stanowiska pracy lub co najmniej w miejscach opisanych powyżej.

W przypadku zmian warunków panujących w poszczególnych pomieszczeniach/przestrzeniach, wynikających na przykład ze zmiany warunków wentylacji lub ze zmian

organizacji pracy, należy pomiary powtórzyć we wszystkich pomieszczeniach, w których znajdują się stanowiska pracy lub co najmniej w miejscach opisanych powyżej.

5.8. Sanatoria, wykorzystujące radon w celach leczniczych.

Do zakładów lecznictwa uzdrowiskowego należą: szpitale uzdrowiskowe, sanatoria uzdrowiskowe, szpitale uzdrowiskowe dla dzieci i sanatoria uzdrowiskowe dla dzieci, przychodnie uzdrowiskowe, zakłady przyrodolecznicze, szpitale w urządzonych podziemnych wyrobiskach górniczych, sanatoria w urządzonych podziemnych wyrobiskach górniczych.

Dobra rozpuszczalność radonu w wodzie powoduje, że gaz ten obecny jest niemal we wszystkich zbiornikach wód powierzchniowych i podziemnych. Niemniej jednak bezpośredni kontakt wód powierzchniowych z atmosferą, a także znaczna ruchliwość tych wód w porównaniu do wód podziemnych, powoduje stosunkowo łatwe uwalnianie z nich radonu do atmosfery. W przypadku zbiorników głębokomorskich i oceanicznych również duża odległość od dna, będącego głównym źródłem tego gazu, sprawia, że radon w wodach powierzchniowych występuje w stężeniach od tysięcznych części Bq/dm³ do kilkunastu, a wyjątkowo do kilkudziesięciu Bq/dm³. Wody mineralne stosowane w lecznictwie uzdrowiskowym zawierają sole mineralne wyflukowane z głębszych warstw litosfery oraz rozpuszczalne gazy: dwutlenek węgla i radioaktywny gaz radon ²²²Rn³³. Radon uwolniony z wody do powietrza jest źródłem zagrożenia dla pracowników zatrudnionych przy wykorzystaniu wód mineralnych. W uzdrowiskach znaczne ilości wody mineralnej zwykle wykorzystuje się w pomieszczeniach zamkniętych, takich jak łazienki, inhalatoria, baseny itp. W takich warunkach może dochodzić do koncentracji radonu w pomieszczeniach, w których przebywają pracownicy. Wodę zawierającą duże ilości radonu — tzw. wody radonowe — stosuje się w lecznictwie uzdrowiskowym w kuracji pitnej i w postaci inhalacji³⁴. Dodatkowo źródłem radonu mogą być wody zawierające w sobie rozpuszczony rad (²²⁶Ra). Wówczas wody takie, głównie wody o dużej mineralizacji i solanki oraz wody termalne mogą również być źródłem radonu uwalnianego do powietrza pomieszczeń, w których są one wykorzystywane w balneoterapii.

Pomiary stężenia radonu powinny być wykonywane we wszystkich miejscach, w których znajdują się stanowiska pracy. W przypadku konieczności ograniczenia liczby pomiarów, badaniami powinny być objęte:

Pomieszczenia biurowe, których pracownicy pracują co najmniej 4 godziny
Pomieszczenia, w których pracownicy pracują co najmniej 4 godziny dziennie, takie jak: inhalatoria, baseny, pomieszczenia z natryskami i wannami oraz innymi urządzeniami zabiegowymi, pijalnie wód mineralnych, rozlewnie wód mineralnych, ujęcia i zbiorniki (zwłaszcza otwarte w pomieszczeniach zamkniętych), pomieszczenia techniczne i inne.

Pomieszczenia na parterach, w których możliwe jest ryzyko znaczącego wnikania radonu, w przestrzeniach podziemnych i piwnicznych, w których pracownicy przebywają co najmniej 50 godzin w ciągu roku, to jest około 1 godzinę w ciągu tygodnia, takie jak: magazyny, warsztaty i inne pomieszczenia zaplecza technicznego, dziennie, zgodnie z ogólnymi wymaganiami pomiarów w miejscach pracy;

Detektory należy umieszczać na wysokości strefy oddychania w miejscu zabezpieczonym przed dostępem przypadkowych osób, w odległości co najmniej 20 cm od ściany w taki sposób, aby zapewnić swobodny dostęp powietrza.

W przypadku zmian warunków panujących w poszczególnych pomieszczeniach, wynikających na przykład ze zmiany warunków wentylacji lub ze zmian organizacji pracy, należy pomiary powtórzyć we wszystkich pomieszczeniach, w których znajdują się stanowiska pracy lub co najmniej w miejscach opisanych powyżej.

6. Podsumowanie

Przedstawione powyżej zasady prowadzenia pomiarów, zgodnie z dobrymi praktykami, stężeń radonu w miejscach pracy, **budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi** mają na celu spowodowanie, by wszystkie wyniki pomiarów stężeń aktywności radonu (^{222}Rn) wykonywane w kraju można było porównać między sobą.

Drugim elementem istotnym dla prawidłowego prowadzenia pomiarów stężenia aktywności radonu (^{222}Rn) jest stosowanie się wszystkich jednostek wykonujących badania do zasad umieszczonych w tym opracowaniu.

7. Literatura

- ¹Bednarek M. 2007, Doskonalenie systemów zarządzania: nowa droga do przedsiębiorstwa. Wydawnictwo DIFIN, Warszawa
- ²Leaderatorium Portal informacyjny dla lokalnych społeczności
<http://cdr112.e-kei.pl/leader/index.php/component/users/?view=remind> 07.12.2020
- ³ www.npl.co.uk 07.12.2020
- ⁴*CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Haynes (red.), wyd. 95, Boca Raton: CRC Press, 2014, ISBN 978-1-4822-0867-2.
- ⁵Eichstaedt I. Księga pierwiastków, Wiedza Powszechna, Warszawa, 1970.
- ⁶Szczeniowski Sz. Fizyka doświadczalna T VI. Fizyka jądra i cząstek elementarnych, PWN, Warszawa, 1974.
- ⁷Raabe O.G.; Concerning the interactions that occur between radon decay products and aerosols. *Health Phys*, 17, 177, 1969
- ⁸Duggan M.J., Howell D.M.; Relationship between the unattached fraction of airborne RaA and the concentration of condensation nuclei. *Nature*, 224, 1190-1191, 1969
- ⁹Busigin A., van der Voorden A.W., Babcock J.C., Phillips C.R.: Nature of unattached RaA (Po-218) particles. *Health Phys*, 40, 383, 1981
- ¹⁰Raes F.; Description of the properties of the unattached ²¹⁸Po and ²¹²Pb particles by means of the classical theory of cluster formation. *Health Phys*, 49, 1177-1187, 1985
- ¹¹ Guillaume V., Nicolas F., The law of Bergonié and Tribondeau: A nice formula for a first approximation. August 2012, *International Journal of Radiation Biology* 89(1) DOI: [10.3109/09553002.2012.717732](https://doi.org/10.3109/09553002.2012.717732)
- ¹² Jankowski J., Staniszewska M.A., Cader A., Chruścielewski W.; Promieniowanie jonizujące. Higiena Pracy pod redakcją J.A. Indulskiego, Tom II, "Zagrożenia fizyczne i biologiczne. Działania ochronne. str. 1-41, 1999.
- ¹³United States Public Health Service. Control of radon and daughters in uranium mines and calculations on biological effects. USPHS Publ. No. 494, 1957
- ¹⁴ International Agency for Research on Cancer (IARC) -Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem,- agenda WHO mieszcząca się w Lyonie we Francji i zajmująca się koordynacją międzynarodowych badań nad nowotworami złośliwymi
- ¹⁵ Kendall, GM i Smith, TJ (2002) Dawki do narządów i tkanek pochodzące od radonu i produktów jego rozpadu. *Journa of Radiological Protection* 22: 389-406
- ¹⁶ IARC (2012). Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem. Monografie IARC dotyczące oceny ryzyka rakotwórczego dla ludzi; Vol. 100D. Przegląd ludzkich czynników rakotwórczych. Część D: Grupa robocza ds. Promieniowania / IARC ds. Oceny ryzyka rakotwórczego dla ludzi. [<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100D/mono100D.pdf>]
- ¹⁷ Darby S, *et al.* (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies *BMJ* 2005; 330 doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63> (Published 27 January 2005)
- ¹⁸World Health Organization Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, (2009)
- ¹⁹ Kodeks Pracy Dz.U.2020.1320 (tekst jednolity)
- ²⁰Prawo atomowe Dz. U. z 2021 r. poz. 1941 (tekst jednolity)

-
- ²¹Rozporządzenie 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. z 2020 r., poz. 1139).
- ²²Dziennik Urzędowy Ministra Środowiska Warszawa, dnia 11 sierpnia 2014 r. poz. 40
- ²³ <http://www.irma-radon.org/>
- ²⁴ George A.C.: State-of-art Instruments for Measuring Radon/Thoron and their Progeny in Dwellings - a Review. *Health Physics*, Vol. 70, No. 4, pp 451-463, 1996.
- ²⁵ Tadeusz A. PRZYLIBSKI Lidia FIJAŁKOWSKA-LICHWA WYSTĘPOWANIE RADONU W OBIEKTACH PODZIEMNYCH O UTRUDNIONEJ WENTYLACJI, *Dzieje górnictwa – element europejskiego dziedzictwa kultury*, pod red. P.P. Zagożdżona i M. Madziarza, Wrocław 2010
- ²⁶ Przewodnik po Polsce. Podziemne trasy turystyczne. Jerzy Roszkiewicz. Daunpol Sp. z o.o. Warszawa, 2011
- ²⁷ Gillmoore G.K., Sperrin M., Philips M., & Denman A. 2000 - Radon Hazards, Geology, and Exposure of Cave Users: a Case Study and Some Theoretical Perspectives, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 46: 279-288.
- Lario J., Sanchez-Moral J.C., Canaveras J.C., Cuezva S. & Soler V. 2005 – Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose. *J. Environ. Radioactivity* 80:161-174
- ²⁸ Przylibski T.A., Fijałkowska-Lichwa L. Występowanie radonu w obiektach podziemnych o utrudnionej wentylacji, w: *Dzieje górnictwa – element europejskiego dziedzictwa kultury*, pod red. P.P. Zagożdżona i M. Madziarza, Wrocław 2010.
- ²⁹ Wysocka M. Radon in Jurassic caves of the Kraków-Częstochowa Upland, *Geochemical journal* GJ 45(6):447-453, 2011
- ³⁰ Przylibski T.A.: Radon: a radioactive therapeutic element. [in]: Gillmore, G. K., Perrier, F. E. & Crockett, R. G. M. (eds): *Radon, Health and Natural Hazards*. Geological Society, London, **2018**, Special Publications, 451, pp. 209-236. <https://doi.org/10.1144/SP451.7>.
- ³¹ Kozłowska B., Walencik A., Przylibski T.A., Dorda J., Zipper W.: Uranium, radium and radon isotopes in selected brines of Poland. *Nukleonika*, 2010, Vol. 55, No. 4, pp. 519-522.
- ³² Health Effects of Exposure to Radon BEIR VI (1999)
- ³³ Przylibski T.A.: Radon. Składnik swoisty wód leczniczych Sudetów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005
- ³⁴ Kochański J.W.: Balneologia i hydroterapia. Akademia Wychowania Fizycznego, Wrocław 2002