

Instytut Medycyny Pracy w Łodzi
Zakład Ochrony Radiologicznej

dr Jerzy Olszewski

**Ocena zawodowego narażenia powstałego w wyniku ekspozycji na
radon w podziemnych trasach turystycznych i uzdrowiskach**

Łódź, kwiecień, 2019

Spis treści

1	Dane osobowe	3
2	Wykształcenie	3
3	Dotychczasowe zatrudnienie w jednostkach naukowych (wraz ze wskazaniem pełnionych w tym czasie funkcji	3
4	Wskazanie osiągnięcia naukowego zgłoszonego jako podstawa postępowania habilitacyjnego	4
	a) Tytuł osiągnięcia naukowego	4
	b) Spis monotematycznych publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe zgłoszone jako podstawa do przewodu habilitacyjnego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)	4
	c) Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	7
5.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	60

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: **Jerzy Olszewski**

2. Wykształcenie

Posiadane dyplomy, stopnie naukowe (z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej):

2001 - Instytut Medycyny Pracy w Łodzi

Tytuł: Doktor nauk medycznych w zakresie biologii medycznej - radiologii

Promotor: Prof. dr hab. Jerzy Jankowski

Praca pod tytułem:

Analiza przydatności Dozymetru Aktywnego jako potencjalnego miernika referencyjnego dla metod pasywnych stosowanych w kopalniach do oceny narażenia górników na pochodne radonu

1980 - 1981 Podyplomowe Studia Fotografii Naukowej i Technicznej przy Uniwersytecie Warszawskim.

1973 -1981 Uniwersytet Łódzki

Wydział: Fizyki i Chemii, fizyka doświadczalna, magister fizyki

Praca pod tytułem:

Badania elektrochemicznego wytrawiania folii Kodak LR – 115 (II) stosowanego jako detektor śladowy cząstek alfa

1969-2073 Liceum Ogólnokształcące w Łodzi,

3. Dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych (wraz ze wskazaniem pełnionych w tym czasie funkcji)

06.1981 – 12.2001: asystent w Zakładzie Skażeń Promieniotwórczych Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi

02.2002 – obecnie: adiunkt w Zakładzie Ochrony Radiologicznej Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi

1987 – obecnie inspektor ochrony radiologicznej IOR-3 w pracowni klasy III

1987 – 2014 - inspektor ochrony radiologicznej IOR-3 w pracowni klasy II w Zakładzie Medycyny Nuklearnej

Od lutego 2016 roku pełnię funkcję prezesa Centrum Radonowego – Międzynarodowej, Pozarządowej Sieci Naukowej.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego zgłoszonego jako podstawa postępowania habilitacyjnego

a) **tytuł osiągnięcia naukowego:**

Ocena zawodowego narażenia powstałego w wyniku ekspozycji na radon w podziemnych trasach turystycznych i uzdrowiskach

b) Spis monotematycznych publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe zgłoszone jako podstawa do przewodu habilitacyjnego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy).

Podstawę osiągnięcia stanowi cykl 9 oryginalnych publikacji oraz dwa artykuły monograficzne autorstwa habilitanta

H1. Olszewski J., Chruścielewski W., Jankowski J., Radon on underground tourist router in Poland. International Congress Series 1276 (2005) 360 – 361, (F=0,20), (3 pkt)

Mój udział polegał na przeprowadzeniu pomiarów, analizie detektorów i opracowaniu wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Udział swój szacuję na 90%

H2. Olszewski J., Chruścielewski W., Kacprzyk J., Kluszczyński D., Kamiński Z., Radon on selected underground tourists router in Poland. Radioactivity in the Environment, Vol. 7, 2005, 803-806, (3 pkt)

Mój udział polegał na zebraniu wszystkich dotychczas uzyskanych wyników pomiarów, przeprowadzeniu analizy tych wyników, dokonania opracowania statystycznego i napisania manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 78%.

- H3. Olszewski J.,** Chruścielewski W., Jankowski J. Radon exposure in selected underground touring routes in Poland. W: Second European IRPA Congress on Radiation Protection. Radiation protection: From Knowledge to Action. 15-19 May 2006 Paris France. Proceedings of full papers. CD-ROM. Paris: International Radiation Protection Association 2006 9 s.

Mój udział polegał na zebraniu wszystkich dotychczas uzyskanych wyników pomiarów, przeprowadzeniu analizy tych wyników, dokonania opracowania statystycznego i napisania manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 90%

- H4. Jerzy Olszewski,** Małgorzata Chodak, Jerzy Jankowski, Rozpoznanie aktualnego stanu narażenia na radon pracowników uzdrowisk w Polsce. Medycyna Pracy 2008;59(1):35 – 38; (6 pkt)

Mój udział polegał na zorganizowaniu pomiarów i opracowaniu metodyki pomiarowej. Przeprowadzeniu pomiarów w uzdrowiska polskich. Opracowanie statystyczne wyników i napisanie publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 91%

- H5. Mamont-Cieśla K.,** Stawarz O., Karpińska M., Kapała J., Kozak K., Grządziel D., Chałupnik S., Chmielewska I., **Olszewski J.,** Przylibski T.A., Żebrowski A. Intercomparison of radon CR-39 detector systems conducted in CLOR's calibration chamber. Nukleonika 2010 Vol. 55 nr 4 s. 589-593; (IF₂₀₁₀=0,321), (20 pkt)

Mój udział polegał na przygotowaniu detektorów do ekspozycji, odczytaniu zarejestrowanej ekspozycji na radon, opracowanie raportu końcowego i przesłanie do CLOR w celu włączenia go do raportu końcowego. Mój udział procentowy szacuję na 10%

- H6. Olszewski J.,** Zmysłony M., Wrzesień M., Walczak K., Występowanie radonu w polskich podziemnych trasach turystycznych. Medycyna Pracy, 66 (4) str. 557-563, 2015; (IF₂₀₁₅=0,397), (15 pkt)

Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań w kilkudziesięciu podziemnych trasach turystycznych, wybór metodyki badań. Prowadzenie badań i analiza wyników. Opracowanie monografii i przygotowanie graficzne do druku. Mój udział procentowy szacuję na 70%

- H7. Olszewski J.,** Casus radon, W: "Ochrona przed promieniowaniem jonizującym i niejonizującym. Nowe uregulowania prawne, źródła, problemy pomiarowe. Warszawa, praca zbiorowa, PTBR, pod redakcją M. Zmysłony, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2015

Mój udział polegał na napisaniu rozdziału na podstawie danych własnych i literaturowych. Mój udział procentowy szacuję na 100%

- H8.** Katarzyna Walczak, **Jerzy Olszewski**, Marek Zmyślony. Estimate of radon exposure in geothermal spas in Poland, International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health 2016;29(1):161 – 166; (IF₂₀₁₆=0,780), (15 pkt)

Mój udział polegał na zaplanowaniu badań. Dokonałem wyboru metodyki pomiarowej oraz prowadziłem pomiary. Przeprowadziłem również wstępną analizę statystyczną. Mój udział oceniam na 50%

- H9.** Katarzyna Walczak, **Jerzy Olszewski**, Piotr Politański, Marek Zmyślony. Occupational exposure to radon in underground tourist routes in Poland: doses to lung and the risk of developing lung cancer. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health 2017;20(5):1–8; (IF₂₀₁₇=0,397), (15 pkt)

Mój udział polegał na zaplanowaniu wszystkich pomiarów, opracowaniu wyników, przeprowadzeniu wstępnych analiz statystycznych. Opracowaniu wniosków końcowych. Mój udział procentowy szacuję na 50%

- H10. Jerzy Olszewski;** The underground tourist route Kowary Drifts – An example to follow. Journal of Environment and Health Science; 2018; DOI 10.15436/2378-6841.18.1684 1-5;

Mój udział polegał na zebraniu i powtórnym opracowaniu wszystkich pomiarów przeprowadzonych przeze mnie w podziemnej trasie od początku jej istnienia. Opracowanie statystyczne i napisanie monografii. Mój udział: 100%

- H11. Olszewski J.,** Radon w świetle prawa atomowego, W: “Ochrona przed promieniowaniem jonizującym i niejonizującym. Nowe uregulowania prawne, źródła, problemy pomiarowe. Warszawa, praca zbiorowa, PTBR, pod redakcją M. Zmyślony, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2018

Mój udział polegał na napisaniu rozdziału na podstawie danych własnych i literaturowych. . Mój udział procentowy szacuję na 100%

Wskaźniki obejmujące publikacje wchodzące w skład dzieła:

Suma IF: **2,262**

Suma punktów MNiSW:77

Średni mój udział przypadający na jedną pracę to 84%.

c) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Spis treści

1. Wstęp	8
2. Cel i zakres badań	8
3. Radon, właściwości, występowanie, pomiar, zagrożenie	9
4. Przepisy prawne – okres przejściowy	15
5. Podziemne trasy turystyczne	16
5.1. Jaskinia Niedźwiedzia	17
5.2. Sztolnie Kowary	19
5.3. Podziemna Trasa Turystyczno–Edukacyjna „Stara Kopalnia Uranu” w Kletnie	25
5.4. Podziemna trasa turystyczna „Złoty Stok”	26
5.5. Podziemne miasta Osówka w Głuszycy	27
6. Pomiary rozpoznawcze w podziemnych trasach turystycznych	28
7. Uzdrowiska i SPA	30
8. Ocena zawodowego narażenia w podziemnych rasach turystycznych i SPA	34
8.1 Ochrona radiologiczna	34
8.2 Ryzyko utraty zdrowia	42
9. Podsumowanie	52
10. Wnioski	55
11. Literatura.	57

1. Wstęp

Nieodłącznym elementem środowiska naturalnego jest promieniowanie. Pochodzi ono zarówno ze źródeł naturalnych, obecnych w skorupie ziemskiej od chwili powstania Ziemi, jak i ze źródeł sztucznych powstałych w toku działalności człowieka. Promieniowanie kosmiczne jest również zawsze obecne. Spośród wszystkich naturalnych źródeł promieniowania na powierzchni Ziemi radon stwarza największe zagrożenie radiologiczne dla człowieka. Jak się obecnie ocenia, ponad połowa obciążenia radiacyjnego ludności Polski od promieniowania naturalnego wynika z wdychania radonu¹.

Pierwiastek ten został odkryty jeszcze w XIX wieku. Dokonał tego w roku 1900 niemiecki chemik Friedrich Ernst Dorn. W tym czasie prowadził on w Halle badania promieniotwórczego rozpadu radu. Gdy próbował ustalić, co dzieje się z masą radu, odkrył promieniotwórczy gaz - "promieniotwórcze powietrze pani Curie". Dorn początkowo nazwał ten gaz nitonem. Dopiero w 1923 roku Międzynarodowy Kongres Nauki o Promieniotwórczości przyjął obowiązującą obecnie dla tego pierwiastka nazwę radon. Jest to kancerogen klasy I.

Zagrożenie radiologiczne stwarza nie sam radon, ale jego pochodne ^{218}Po i ^{214}Po , które przyłączone do cząstek aerozoli osadzają się razem z nimi głównie na ściankach oskrzeli. Emitują one cząstki alfa o energiach odpowiednio 6,0 MeV i 7,69 MeV, których energia jest dostateczna, aby napromienić warstwy komórek podstawnych oskrzeli i płuc. Ekspozycja na pochodne radonu może prowadzić do rozwoju raka płuc.²

2. Cel i zakres badań

W grudniu 2013 roku ukazała się Dyrektywa Rady 2013/59/EURATOM ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego³. W Dyrektywie zapisano, że ochrona przed naturalnymi źródłami promieniowania powinna zostać w pełni włączona do ogólnych ochrony radiologicznej. Zawarte są w niej dwa stwierdzenia szczególnie istotne dla ochrony przed negatywnym wpływem radonu na organizm człowieka. Pierwsze to informacja, że występuje statystycznie istotny wzrost ryzyka zachorowania na nowotwory płuc w wyniku przedłużonego narażenia na radon wewnątrz pomieszczeń na poziomie rzędu 100 Bq m^{-3} . Druga to zalecenie ustanowienia przez Państwa członkowskie krajowego poziomu referencyjnego dla stężeń radonu w miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń. Wartość poziomu referencyjnego nie może

przekraczać 300 Bqm^{-3} średniego rocznego stężenia radonu w powietrzu zarówno w pracy jak i w domu, chyba, że jest to zagwarantowane z uwagi na panujące warunki krajowe.

Można wobec powyższego postawić pytanie: gdzie można się spodziewać podwyższonych stężeń radonu? Najczęściej zagrożenie radonowe łączy się z kopalniami podziemnymi szczególnie z kopalniami uranu.

Celem pracy było oszacowanie wielkości zagrożenia zdrowia pracowników podziemnych tras turystycznych, uzdrowisk oraz SPA powodowanego występowaniem w miejscu pracy promieniotwórczego gazu radonu.

Analizy przedstawione w moim autoreferacie oparte są o badania przeprowadzone przeze mnie na przestrzeni kilkunastu lat.

Omówione zostaną również konsekwencje wprowadzenia do przepisów prawnych zaleceń zawartych w Dyrektywie oraz problemy oceny tego narażenia wynikające ze specyfiki oddziaływania radonu na organizm ludzki.

3. Radon – właściwości, występowanie, pomiar, zagrożenie

W szeregu promieniotwórczym zaczynającym się od izotopu uranu ^{238}U występuje rad (^{226}Ra) o okresie połowicznego rozpadu wynoszącym 1620 lat. Podczas rozpadu radu powstaje radon (^{222}Rn). Radon jest pierwiastkiem należącym do grupy helowców, czyli gazów szlachetnych, jest gazem niewidocznym, bez zapachu i smaku, łatwo rozpuszczalnym w wodzie i niektórych rozpuszczalnikach organicznych.⁴ Radon występuje w przyrodzie w postaci trzech izotopów promieniotwórczych. Wszystkie powstają z izotopów radu. Radon ^{219}Rn (aktynon) z radu ^{223}Ra , ^{220}Rn (toron) z ^{224}Ra i ^{222}Rn (radon) z ^{226}Ra . Dwa pierwsze mają krótkie czasy połowicznego rozpadu (4 i 58 sekund) natomiast radon (^{222}Rn) ma okres połowicznego rozpadu równy 3,8 dnia.⁵ Radon jest gazem, ma, więc zdolność przemieszczania się, a długi okres połowicznego rozpadu ^{222}Rn umożliwia mu wędrówkę w środowisku od miejsca powstania do powietrza atmosferycznego, lub przestrzeni zamkniętych takich jak jaskinie, tunele, mieszkania itp. Tak, więc radon uczestniczy w procesie oddychania człowieka i ze względu na swoje właściwości promieniotwórcze może mieć wpływ na jego zdrowie.

Radon powstały po rozpadzie radu rozprzestrzenia się do środowiska poprzez uwalnianie z ziaren gleby i skał do pęknięć, szczelin i por w tych strukturach. Środowiskiem tym może być powietrze lub woda lub też, w niektórych przypadkach, ropa naftowa albo gaz ziemny. Po uwolnieniu radonu następuje jego migracja przez szczeliny do powietrza

atmosferycznego⁶, a w przypadku podziemnych tras turystycznych do atmosfery pomieszczeń trasy. W podziemnych trasach turystycznych może występować radon o stężeniach do kilku tysięcy Bq·m⁻³.

Jak już wspomniano dobra rozpuszczalność radonu w wodzie powoduje, że gaz ten obecny jest niemal we wszystkich zbiornikach wód powierzchniowych i podziemnych. W wodach podziemnych stężenia radonu wahają się w granicach od ułamka Bq·dm⁻³ do kilkuset tysięcy Bq·dm⁻³ i są zależne przede wszystkim od budowy geologicznej i charakterystyki mineralogiczno-petrologiczno-geochemicznej rejonu wypływu lub ujęcia^{7,8}. Zwiększonego stężenia tego gazu w wodzie można się spodziewać jedynie w środowisku wód podziemnych. Wody podziemne, a wśród nich także wody silnie zmineralizowane i termalne, a więc takie, w których rozpuszczalność gazów jest mniejsza, często zawierają radon w stężeniach przekraczających kilkaset, czy nawet 1000 Bq·dm⁻³. Wody mineralne stosowane w lecznictwie uzdrowiskowym zawierają sole mineralne wypłukiwane z głębszych warstw litosfery oraz rozpuszczalne gazy: dwutlenek węgla i radioaktywny gaz radon ²²²Rn⁹. Radon uwolniony z wody do powietrza może być źródłem zagrożenia dla pracowników zatrudnionych przy wykorzystaniu wód mineralnych.

W uzdrowiskach, a jest ich w Polsce kilkadziesiąt, wykorzystuje się znaczne ilości wody mineralnej zwykle w pomieszczeniach zamkniętych takich jak łazienki, inhalatoria, baseny itp.¹⁰ W takich warunkach może dochodzić do koncentracji radonu w pomieszczeniach, w których przebywają pracownicy. Zjawisko to może mieć także miejsce podczas stosowania wód nieradonowych, czyli wód zawierających mniej niż 74 Bq/l (2 nCi/l) radonu w litrze wody¹¹.

Wodę zawierającą duże ilości radonu tzw. wody radonowe stosuje się w lecznictwie uzdrowiskowym w kuracji pitnej i w postaci inhalacji.

W Polsce jest coraz bardziej popularne wykorzystywanie termalnych wód do rekreacji. Prosperujących ośrodków wykorzystujących naturalne wody termalne tzw. SPA, jest w Polsce kilkanaście. Zazwyczaj badania wód termalnych czy uzdrowiskowych koncentrują się na zawartości mikroelementów i pierwiastków (w tym promieniotwórczych z uwzględnieniem radu i radonu) w wodzie. Wysokie stężenia radonu w wodzie mogą powodować występowanie zwiększonego stężenia radonu w powietrzu, a tym samym zwiększać narażenie pracowników na otrzymanie dawki od radonu.

Metody pomiarowe

Techniki pomiarowe służące do pomiaru stężenia radonu, energii potencjalnej lub radonu i energii potencjalnej jednocześnie wykorzystują najczęściej promieniowanie alfa emitowane podczas rozpadu radonu i niektórych krótkożyjących produktów jego rozpadu (polon ^{218}Po i ^{214}Po).

Energia emitowanych podczas promieniotwórczego rozpadu cząstek alfa powoduje, że silnie działają one na napotkane cząsteczki czy atomy. W 1903 r. W. Crookes oraz J. Elster i H. Geitel wykryli równocześnie zjawisko scyntylacji, czyli pojawiania się krótkotrwałego rozbłysku świetlnego powstającego przy przechodzeniu cząstek naładowanych (np. alfa) przez substancje luminezujące tzw. scyntylatory. Pod koniec lat pięćdziesiątych odkryto, że ciężkie, naładowane cząstki (np. alfa) przechodząc przez dielektryki stałe, włączając kryształy, szkła nieorganiczne i tworzywa sztuczne, pozostawiają ultramikroskopowe ślady. Po raz pierwszy takie ślady obserwowali w micy w 1959 r. E.C. Slik i R. S. Barnes.¹² Stosując mikroskop elektronowy, obserwowano podłużne, w kształcie kresek, obszary uszkodzeń - "ślady". W większości materiałów detekcyjnych powstanie śladów związane jest z tym, że przelot naładowanej cząstki powoduje jonizację atomów na jej trasie, co w konsekwencji uszkadza sieć krystaliczną. W materiałach czułych na cząstki alfa bardziej prawdopodobne jest powstawanie śladów przez naruszenie wiązań chemicznych.¹³ Powstałe w detektorze uszkodzenia można obserwować tylko przez mikroskop elektronowy. Dla umożliwienia obserwacji w mikroskopie optycznym należy detektor poddać wytrawieniu chemicznemu.^{14,15,16,17}

W chwili obecnej do pomiarów stężeń radonu i energii potencjalnej promieniowania alfa jego krótkożyciowych pochodnych stosuje się na świecie wiele przyrządów pomiarowych. Należą do nich między innymi: Atmos-12D, Alpha Guard MC50, Pylon AB-5, Pylon CPRD, EML Radometer, Sun Nuclear-1023 (radon) oraz Eberline WLM-14, Thom./Nielsen IRMP, Scintrex WLM-30, Alpha Nuclear-770A czy Pylon WLx (energia potencjalna).¹⁸

W Instytucie Medycyny Pracy w Łodzi stosowane są następujące przyrządy i metody pomiarowe.

1. Dozymetry pasywne z detektorem śladowym - do pomiaru indywidualnych ekspozycji na radon (pochodne radonu) i/lub okresowych stężeń radonu.
2. Komórki scyntylacyjne do pomiarów stężeń chwilowych

Dozymetr pasywny

Określenie "dozymetr pasywny" oznacza, że rejestracja promieniowania następuje w sposób bierny bez użycia wspomagających urządzeń mechanicznych lub elektronicznych. Dozymetr pasywny składa się z: kasety dozymetrycznej i detektora śladowego. Do pomiarów długookresowych stężeń radonu w podziemnych trasach turystycznych stosowany był dozymetr zamknięty typu NRPB. Kasetę dozymetryczną zamkniętą typu NRPB wykonana jest z tworzywa sztucznego.¹⁹ Składa się ona z dwóch części. Wymiary kaset to: średnica 5,5 cm, grubość - 2 cm. Detektor śladowy typu CR-39 umieszczony jest wewnątrz kasety. Istotną cechą konstrukcyjną kasety NRPB jest to, iż po jej zamknięciu poprzez mikroszczeliny dyfunduje do środka wyłącznie gaz. W komorze kasety ustala się, więc takie stężenie radonu, jakie panuje w otaczającym kasetę powietrzu, niezależnie od stężenia pochodnych radonu. Jest to, więc miernik ekspozycji na radon. W przypadku znajomości dokładnego czasu pomiaru można wyliczyć średnie stężenie radonu występujące w powietrzu w tym okresie. Dozymetr NRPB zaprezentowany jest na rysunku 1. Po zakończeniu ekspozycji detektory śladowe poddawane są obróbce chemicznej polegającej na ich wytrawieniu w 20% roztworze NaOH, w temperaturze 80° C, w czasie 18 godzin. Analiza detektorów śladowych dokonywana jest za pomocą systemu analizy obrazu firmy IMAL²⁰ będącego na wyposażeniu Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi.

W wyniku analizy otrzymuje się gęstość śladów na mm^2 , która następnie przeliczana jest na wielkość ekspozycji, na jaką poddany był detektor. Ze względu na możliwości odczytu detektor może rejestrować ekspozycje do 1 MBqhm^{-3} .



Rys. 1. Rozłożona kasetka dozymetryczna typu NRPB z detektorem CR-39.

Komórki scyntylacyjne

Do pomiaru chwilowego stężenia radonu w powietrzu stosowany był miernik RDA-200 składający się z komór scyntylacyjnych, tzw. komór Lucasa oraz układu rejestrującego z fotopowielaczem produkcji kanadyjskiej firmy EDA. Pomiar stężenia radonu dokonuje się w oparciu o pomiar aktywności promieniotwórczej alfa próby powietrza pobranej przez filtr do komory scyntylacyjnej za pomocą pompki ręcznej lub mechanicznej. Objętość komory scyntylacyjnej wynosi 176 cm^3 . Dolny próg detekcji to $0,03 \text{ kBqm}^{-3}$. Zestaw pomiarowy produkcji firmy Pylon z Kanady przedstawiony jest na rysunku 2.



Rys. 2. Miernik RDA-200 firmy Pylon (Kanada) do pomiaru chwilowych stężeń radonu.

Zagrożenie

Przebywający w środowisku człowiek oddycha powietrzem z radonem i zawieszonymi w nim aerozolami promieniotwórczymi. Układ oddechowy człowieka można podzielić na trzy części: część nosowo-gardłową, część tchawiczo-oskrzelową i część pęcherzykowo-mięszową. Po okresie rzędu sekundy gazy, a więc i radon, usuwane są na zewnątrz organizmu. Aerozole promieniotwórcze pozostają natomiast osadzone na powierzchni nabłonka oskrzeli i w części pęcherzykowo-mięszowej układu oddechowego.²¹ Pozostają one tam wystarczająco długo by wszystkie krótkożyciowe produkty rozpadu radonu uległy rozpadowi. Pył, a więc i aerozole promieniotwórcze, które przeniknęły do pęcherzyków płucnych zostają pochłonięte przez makrofagi płucne i wraz z nimi są częściowo eliminowane do dróg oddechowych, a częściowo do regionalnych węzłów chłonnych. Dzięki tym właściwościom samooczyszczania płuc, tylko niewielka część wdychanego pyłu, bo około 5% zostaje zatrzymana w układzie oddechowym.²² Proces ten jest jednak na tyle powolny, że jedynie ołów (^{210}Pb), również promieniotwórczy o czasie połowicznego rozpadu równym 22,3

lat ma szansę być częściowo wydany z organizmu. Tak więc zasadniczy udział w dawce dla układu oddechowego ma rozpad krótkożytych pochodnych radonu.

O prawdopodobnym szkodliwym działaniu radonu pisano już dość dawno nie znając oczywiście przyczyn tego zjawiska. Jedną z najstarszych wzmianek o schorzeniach związanych z pracą w kopalni można znaleźć u Tytusa Lukrecjusza Carusa.²³ W swojej pracy pt. "De Rerum Natura" z I wieku p.n.e. opisuje on szkodliwy wpływ wydobywających się z ziemi gazów na górników pracujących w kopalniach złota. Opis dotyczy podziemnych kopalń znajdujących się w pobliżu góry Anganion w starożytnej Tracji (Grecja). Można sądzić, iż jednym z powodów występujących u górników schorzeń był radon i jego pochodne. Według współczesnego radiologicznego atlasu Europy jest to obszar o podwyższonym stężeniu radonu.²⁴ W 1556 roku Agricola opisał zwiększoną zapadalność na choroby płuc i oskrzeli wśród górników pracujących w kopalniach w rejonie Scheneeburgu i Jachymova.²⁵ W 1879 roku stwierdzono, iż chorobą tą był nowotwór płuc.²⁶

Wzorcowanie metod pomiarowych

Przed zastosowaniem detektory śladowe podlegają wzorcowaniu. W Instytucie Medycyny Pracy do wzorcowania detektorów śladowych wykorzystywana jest komora radonowa o objętości 2 m³. Metodą referencyjną stosowaną we wzorcowaniu przyrządów pomiarowych i detektorów śladowych jest metoda „dwóch filtrów”²⁷. Metoda ta polega na przefiltrowaniu powietrza zawierającego radon i aerozole promieniotwórcze przez dwa filtry umieszczone na końcach metalowej rury o długości 0,5 m. Pierwszy filtr zatrzymuje aerozole promieniotwórcze przepuszczając radon. Drugi filtr zatrzymuje pochodne radonu powstałe w czasie przebywania radonu w rurze. Do wzorcowania stosowane są atestowane emanatory radonu firmy Pylon z Kanady.

Detektory poddawane są ekspozycji w minimum trzech stężeniach radonu w czasie nie krótszym niż 8 godzin. Na podstawie przeprowadzonych odczytów gęstości śladów powstałych na detektorze obliczane są współczynniki umożliwiające przeliczenie gęstości śladów na wielkość ekspozycji jakiej poddany był detektor,²⁸ a znając dokładny czas ekspozycji można policzyć średnie stężenie radonu za okres ekspozycji.

Komora radonowa stosowana jest również do wzorcowania komór scyntylacyjnych. W komorze radonowej wytwarzane jest za pomocą emanatorów określone stężenie radonu kontrolowane metodą dwóch filtrów. Następnie powietrze z radonem przepuszczane jest przez komory scyntylacyjne. W wyniku wzorcowania otrzymuje się współczynnik przeliczeniowy

umożliwiający przeliczenie liczby zarejestrowanych przez fotopowielacz impulsów na chwilowe stężenie radonu w powietrzu. Aparatura stosowana do pomiaru oraz mierniki ekspozycji indywidualnych na radon lub/i energię potencjalną muszą podlegać systematycznemu wzorcowaniu minimum raz do roku.

Zakład Ochrony Radiologicznej posiada akredytację PCA AB 837 na pomiar ekspozycji na radon (stężenia radonu) za pomocą detektorów śladowych.

Oprócz regularnych wzorcowań prowadzone są również systematycznie porównania międzylaboratoryjne metod pomiarowych²⁹. W roku 2016 przeprowadzono międzylaboratoryjne porównania w Głównym Instytucie Górnictwa³⁰ w Katowicach (czerwiec) i w podziemnej trasie turystycznej „Sztolnie Kowary” (wrzesień). W roku 2018 podobne porównania odbyły się w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej³¹.

W roku 2013 uczestniczyłem w międzynarodowym porównaniu metod pomiarowych stężeń radonu w czeskiej Pradze.³²

4. Przepisy prawne – okres przejściowy

W chwili obecnej znajdujemy się w okresie przejściowym, jeśli chodzi o zapisy prawne dotyczące radonu. Wynika to z faktu ukazania się Dyrektywy DYREKTYWA RADY 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 r. Dyrektywa ta ustanowiła podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz uchyliła dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom³. Państwa członkowskie powinny były wprowadzić w życie przepisy ustawowe, wykonawcze i administracyjne niezbędne do wykonania tej dyrektywy najpóźniej do dnia 6 lutego 2018 r. (nowe Prawo atomowe)

Dyrektywa licząca sobie 73 strony ujednolica i aktualizuje prawodawstwo w krajach UE wykorzystując najnowsze badania i osiągnięcia z dziedziny ochrony radiologicznej. Dyrektywa ma zastosowanie do wszelkich sytuacji narażenia planowanego, istniejącego lub wyjątkowego, wiążących się z zagrożeniem wynikającym z narażenia na działanie promieniowania jonizującego, którego nie można zlekceważyć z punktu widzenia ochrony przed promieniowaniem lub w odniesieniu do środowiska, mając na uwadze długoterminową ochronę zdrowia ludzi. Jest to nowe podejście do ochrony radiologicznej obejmujące praktycznie wszystkie sytuacje, w których człowiek jest narażony na działanie promieniowania jonizującego

Punktem wyjścia do nowego podejścia do narażenia na radon i jego pochodne jest stwierdzenie, iż „z najnowszych danych epidemiologicznych pochodzących z badań ludności przebywającej w budynkach mieszkalnych wynika, że występuje statystycznie istotny wzrost ryzyka zachorowania na nowotwór płuc w wyniku przedłużonego narażenia na radon wewnątrz pomieszczeń na poziomie rzędu 100 Bq m^{-3} ”. Preambuła Dyrektywy punkt 22. W punkcie 23 zwrócono uwagę na to, że połączenie palenia tytoniu i wysokiego narażenia na radon powoduje znacznie wyższe ryzyko wystąpienia raka płuc u pojedynczej osoby niż każdy z tych czynników z osobna, oraz że palenie tytoniu zwiększa ryzyko wynikające z narażenia na radon na poziomie populacji. Stwierdzono również, że ważne jest, aby państwa członkowskie zajęły się obydwojema rodzajami zagrożeń dla zdrowia.

W chwili obecnej projekt ustawy Prawo atomowe wpłynął do Sejmu RP w dniu 20 lutego 2019 (druk 3237). Został następnie skierowany do I czytania w Komisji Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa. Termin przedstawienia sprawozdania do dnia 06-05-2019³³

W tym miejscu warto chyba zacytować najważniejszy artykuł z nowej ustawy Prawo atomowe.

„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 Bqm^{-3}** (bekereli na metr sześcienny).

5. Podziemne trasy turystyczne

Szacuje się, że w Polsce działa obecnie około 240^{34} podziemnych tras turystycznych, w których może być zatrudnionych ponad 1,5 tys. osób. W roku 2000, czyli od momentu, w którym zainteresowałem się problemem narażenia pracowników w podziemnych trasach turystycznych, tras podziemnych było 27. Od roku 2000 do chwili obecnej kontrolą w różnych okresach objęte były cztery podziemne trasy turystyczne. Są to w wg daty rozpoczęcia pomiarów: Jaskinia Niedźwiedzia (1995), Nieczynna Kopalnia Uranu w Kowarach „Sztolnie Kowary” (2001), Nieczynna Kopalnia Uranu w Kletnie (2004), Nieczynna Kopalnia Złota „Złoty Stok” (2004), Podziemne miasto Osówka w Głuszycy (2004). Pierwsze wyniki pomiarów wykonanych w podziemnych trasach turystycznych opublikowane zostały przeze

mnie w 2005 roku. Pomiary wykonano w Jaskini Niedźwiedziej, Sztolni Kowary i w Nieczynnej Kopalni Uranu w Kletnie.³⁵

W roku 2012 w ramach prac badawczych Instytutu Medycyny Pracy przeprowadziłem pomiary w 66 trasach podziemnych w Polsce.

Poniżej zostaną omówione wyniki dwudziestoletnich pomiarów. Pomiary te wykonywałem osobiście, jedynie przez pierwsze 5 lat pomiary w Jaskini Niedźwiedziej wykonywane były przez inne osoby pracujące w Zakładzie Ochrony Radiologicznej IMP. Do analizy zagrożenia radonem w polskich podziemnych trasach turystycznych i uzdrowiskach wykorzystane zostaną jedynie pomiary wykonane przeze mnie.

5.1. Jaskinia Niedźwiedzia.

Jaskinia Niedźwiedzia odkryta została przypadkiem w 1966 roku podczas eksploatacji kamieniołomu Kletno III.³⁶ W 1977 roku Jaskinię i jej najbliższe otoczenie uznano za rezerwat przyrody. W 1983 roku część jaskini udostępniono turystom. Łączna długość korytarzy jaskini wynosi 2500 metrów, a długość trasy turystycznej około 400 m. Czas zwiedzania wynosi około 45 minut.

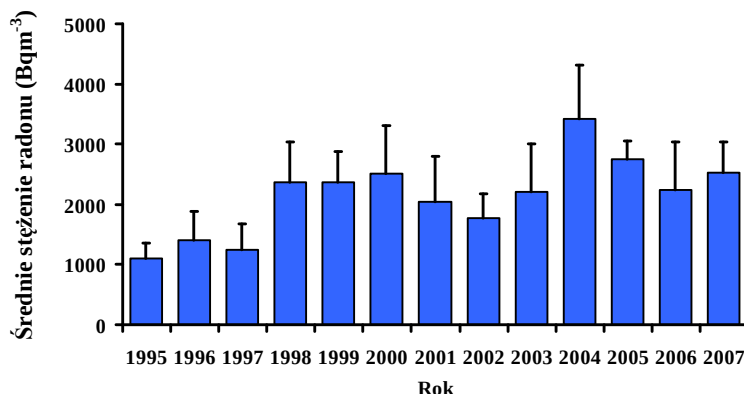
W Jaskini Niedźwiedziej pierwsze pomiary promieniowania jonizującego przeprowadzono już w roku 1967. Mierzono stężenia radonu w wodzie i powietrzu. Wyniki tych badań zostały opublikowane w 1978 r.³⁷. Występujące wtedy stężenia radonu były rzędu kilku tysięcy Bqm⁻³. (np. 5100 Bqm⁻³ w Sali Lwa). Przeprowadzone wtedy badania zaowocowały wnioskiem, że w tej trasie turystycznej należy prowadzić systematyczne pomiary stężeń radonu w powietrzu.

Jednakże systematyczne pomiary rozpoczęto dopiero w 1994 roku. Do pomiarów średnich miesięcznych stężeń radonu stosowane były dozymetry pasywne typu NRPB (zamknięty). Od 2001 pomiary w Jaskini Niedźwiedziej prowadziłem osobiście.

Detektory umieszczane były w wybranych przez zleceniodawców punktach na okres jednego miesiąca. Punktów pomiarowych łącznie w okresie pomiarowym było 16. Systematyczne pomiary stężeń radonu zakończono w roku 2004/2005. Po zakończeniu 10. letniego cyklu pomiarowego przeprowadziłem jeszcze pomiary stężeń radonu w roku 2006 i 2007. Średnie roczne stężenia wyniosły odpowiednio 2,24 i 2,53 kBqm⁻³. W roku 1995 średnie stężenie wyniosło 1080 Bqm⁻³. W latach następnych zaobserwowano wzrost stężenia radonu. Najwyższe średnioroczne stężenie radonu (3400 Bqm⁻³) zanotowano w roku 2004³⁸.

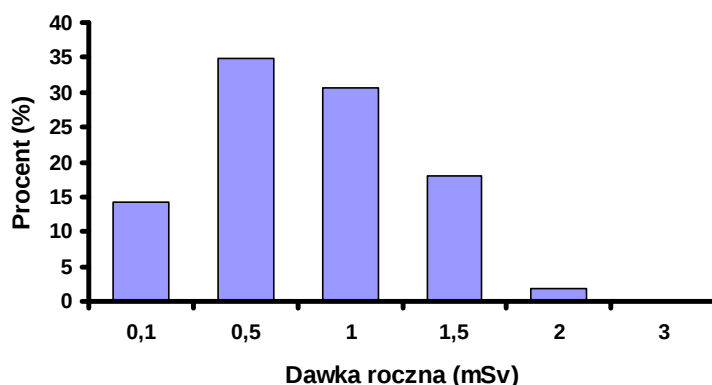


Średnie stężenie radonu za dziesięć lat wynosi $2200 \pm 700 \text{ Bqm}^{-3}$. Na rysunku nr 3 przedstawione są wyniki pomiarów średnich rocznych stężeń radonu w Jaskini Niedźwiedziej.



Rys 3. Wyniki pomiarów średnich rocznych stężeń radonu w Jaskini Niedźwiedziej^{39,40}.

W Jaskini Niedźwiedziej nie były prowadzone pomiary ekspozycji indywidualnych na radon pracowników obsługujących trasę. Na podstawie posiadanych danych o czasie pracy pracowników można jedynie oszacować spodziewaną dawkę, jaką mogli oni otrzymać. W jaskini zatrudnionych jest około 50 osób. Biorąc pod uwagę czas pracy poszczególnych pracowników oraz średnie stężenia występujące w ostatnich pięciu latach pomiarowych tzn. od 2003 do 2007 wyliczono dawki roczne, jakie mogły otrzymać osoby tam pracujące. Przyjęto podany przez UNSCEAR 2000 współczynnik konwersji ekspozycji na dawkę równy $9 \text{ nSv/Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}$. Rozkład dawek przedstawiony jest na rys 4.



Rys 4. Rozkład spodziewanych rocznych dawek efektywnych od radonu oszacowanych na podstawie czasu pracy i średnich rocznych stężeń radonu.

Należy również zwrócić uwagę na fakt stosunkowo krótkich czasów przebywania pracowników w Jaskini, który wynosi około 4% nominalnego czasu pracy w roku. Przy znacznym zwiększeniu czasu pracy należy się spodziewać dawek rocznych przekraczających 6 mSv, co oznacza, że pracownicy należeć będą do kategorii A¹ narażenia. W tym przypadku należałoby wprowadzić dozymetrię indywidualną.

Niestety od roku 2007 nie prowadziłem pomiarów stężeń radonu w Jaskini Niedźwiedziej.

5.2. Sztolnie Kowary

Powstanie i rozwój Kowar wiąże się przede wszystkim z górnictwem rud żelaza i kowalstwem. Przekaz ustny podaje, że w 1148 roku gwarek Walon Wawrzyniec Angelus odkrył na zboczu Góry Rudnik rudę żelaza. 10 lat później z polecenia ówczesnego księcia Polski Bolesława Kędzierzawego założono osadę. Kowary położone są w dolinie rzeki Jedlicy – w jej górnym biegu, pomiędzy Rudawami Janowickimi, a Karkonoszami.

Intensywny rozwój górnictwa kowarskiego przypada na wiek XIX i XX-ty. Wówczas odbywa się wzmożone wydobywanie rud żelaza, fluorytu, rud cynkowo-ołowianych, srebra, miedzi i uranu.⁴¹

Eksploracje rudy uranowej w Kowarach rozpoczęto przed II wojną światową ze złóż magnetytu w kopalni Wolność gdzie prawdopodobnie wydobyto 70 ton uranu w rudzie. Po wojnie przeprowadzono poszukiwania geologiczne, których pozytywny wynik zaowocował uruchomieniem w 1948 Kowarskich Kopalń. Utworzone zostały zakłady ZPR-1. Zakłady Przemysłowe R-1 były bardzo duże. Należały do nich wszystkie kopalnie wydobywające rudy uranu również w innych rejonach kraju np. w Rudkach koło Kielc. W Kowarach znajdował się zarząd tych kopalń, laboratorium, baza transportowa i warsztaty. W Zakładach R-1 w latach 1948 do 1972 pracowało około 25-26 tysięcy ludzi. W początkowym okresie wszystkie prace objęte były klauzulą tajności. Dopiero od roku 1956 do pracy przyjęci zostali polscy specjaliści.

Od roku 1952 ze względu na rozwój technologii termojądrowej zainteresowanie wydobywaniem rud uranowych w których zawartości rozszczepialnego izotopu U-235 wynosi około 0,7% (w stosunku do sumy izotopów) staje się do celów militarnych mniej atrakcyjne. W 1957 roku opuszczają zakłady R-1 ostatni Rosjanie. Po wyczerpaniu się nadających się do

¹ Kategoria A narażenia na promieniowanie oznacza, że pracownik może otrzymać roczną dawkę skuteczną przekraczającą 6 mSv.

eksploatacji złóż ostatnia kopalnia „Wolność” została zamknięta w 1962 r. Od tego czasu Zakłady R-1 prowadziły likwidację kopalń, a w 1973 r. nastąpiło ich formalne rozwiązanie.

W kopalniach występowały niebezpieczeństwa typowo górnicze, przede wszystkim zapylenie powstające przy urabianiu oraz transporcie rudy i skały. O zagrożeniach związanych z występowaniem promieniowania do roku 1957 nic oficjalnie nie było mówione. W kopalniach rud uranu występują dwa rodzaje zagrożenia od promieniowania jonizującego. Jest to podwyższony poziom natężenia promieniowania gamma i wysokie stężenie radonu i jego pochodnych w powietrzu. Według dostępnych mi danych stężenia radonu sięgały np. w III kwartale 1957 roku w zależności od miejsca pomiaru od 18,5 do 888 kBq^{m⁻³}.⁴² Co oznacza, iż w tym okresie dawki od radonu, na jakie narażeni byli górnicy mogły przekraczać 1 Sv. Po zakończeniu eksploatacji kopalń pozostały sztolnie wydobywcze i poszukiwawcze, hałdy wydobytego surowca i inne elementy kopalniane.

Dość wcześnie, bo już w 1968 roku pojawiła się koncepcja wykorzystania wyrobisk po zakończeniu eksploatacji kopalń. Planowano uruchomienie podziemnego inhalatorium radonowego w byłej kopalni Podgórze na wzór inhalatorium w Bad Gastein w Austrii. Pierwszą komorę inhalacyjną oddano do próbnego leczenia pacjentów w roku 1974. Wykorzystano do tego sztolnię nr 19. W roku 1975 powstała koncepcja zagospodarowania innej sztolni kopalni Podgórze, a mianowicie sztolni nr 9. Miało tu być laboratorium górnicze dla Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. W sztolni nr 9 uruchomiono również komorę inhalacyjną dla około 20 pacjentów. Na przełomie lat 89/90 przemiany ustrojowe i warunki ekonomiczne spowodowały wygaszenie działalności w kopalni Podgórze zamknięcie inhalatoriów i laboratorium. Rejon sztolni 9 i 19 przez kilka lat leżał odłogiem i ulegał stopniowej dewastacji.

Przed całkowitym zniszczeniem sztolni nr 9 i budynków, jakie tam powstały uchroniła te obiekty działalność przedsiębiorców z Wielkopolski panów Marka Jankowskiego i Wojciecha Jabłońskiego. Ich zainteresowanie sztolnią nr 9 zaowocowało uruchomieniem 29 kwietnia 2000 roku Podziemnej Trasy Turystycznej „Sztolnie Kowary” a w 2002 roku uruchomienie Inhalatorium Radonowego. Długość udostępnionej do zwiedzania trasy wynosi 1200 m. Turyści zwiedzają trasę w czasie około jednej godziny.

Od początku realizacji tych planów właściciele sztolni mieli świadomość⁴³ występowania na tym terenie radonu, który może być szkodliwy dla zdrowia pracowników.

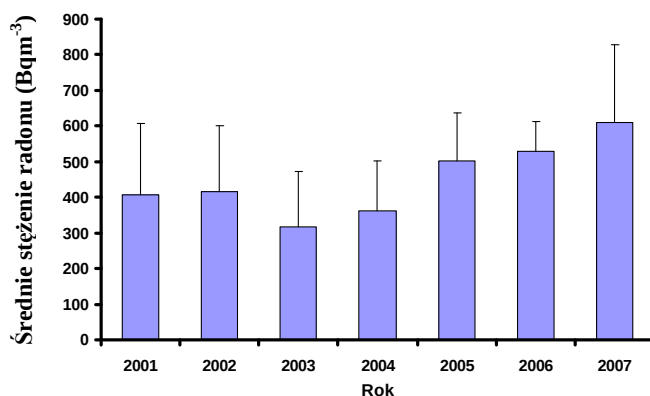
Jeszcze przed uruchomieniem trasy już w roku 1999 zostały przeprowadzone badania parametrów radiologicznych środowiska podziemnej sztolni 9 i 9a w Kowarach – Podgórzu.

Jest to oczywiście przyszła trasa turystyczna „Sztolnie - Kowary”. Pomiary obejmowały pomiary zarówno chwilowych jak i długookresowych stężeń radonu⁴⁴.

Przeprowadzone badania wykazały, że obecność promieniowania w wyrobiskach sztolni 9 i 9a wynika głównie z ekshalacji ze skał radioaktywnego gazu radonu, który może osiągnąć chwilowe wartości stężeń aktywności do 1000 Bqm^{-3} , natomiast wartości średnie długookresowe są ustabilizowane na poziomie ok. 400 Bqm^{-3} , co było potwierdzone długotrwałymi, dwukrotnymi badaniami.

Już w roku 2000 w wyniku podpisanej umowy pomiędzy Instytutem Medycyny Pracy w Łodzi rozpoczęto systematyczne pomiary narażenia na radon w podziemnej trasie turystycznej. Pierwsze pomiary ze względów organizacyjnych wykonano na przełomie 2000 i 2001 roku. Przyjęto kwartalny okres pomiarowy. Dozymetrią indywidualną objęto 6. przewodników, a dozymetry środowiskowe umieszczono w 4 punktach trasy. Średnie stężenie radonu, w jakim badanym okresie pracowali pracownicy objęci dozymetrią indywidualną wyniosło $560 \pm 50 \text{ Bqm}^{-3}$, Średnie stężenie radonu w badanym okresie zmierzone dozymetrami środowiskowymi wyniosło $520 \pm 140 \text{ Bqm}^{-3}$.

Pomiary okresowych stężeń radonu prowadzone były w pięciu punktach na trasie turystycznej w okresach kwartalnych. Wyniki pomiarów średnich rocznych stężeń radonu ilustruje rysunek 5.

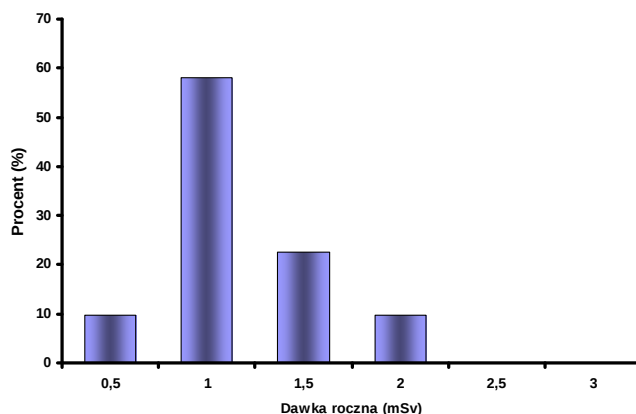


Rys. 5. Wyniki pomiarów średnich rocznych stężeń radonu na trasie turystycznej „Sztolnie Kowary”

Wyniki badań wykonane w latach 2001 - 2007 wykazały, że średnie roczne stężenia radonu w sztolni, zawierały się w granicach od 300 do 600 Bqm^{-3} . Średnie pięcioletnie stężenie radonu wyniosło $450 \pm 100 \text{ Bqm}^{-3}$.

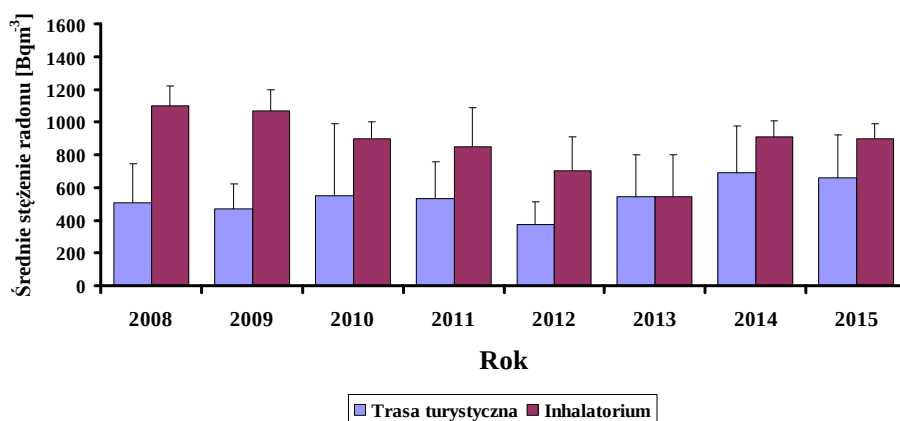
Kontrolą ekspozycji indywidualnych objętych było w latach 2001 – 2007 łącznie 17 osób (przewodnicy i personel obsługi). Rozkład dawek indywidualnych od radonu w tym okresie pomiarowym przedstawiony jest na rys 6. Średnia oszacowana dawka roczna wyniosła $0,92 \pm 0,37$ mSv. Maksymalna dawkę roczną 1,73 mSv, zarejestrowano w 2002 roku.

Mieszane pomiary narażenia na radon prowadzone były w Sztolni Kowary do roku 2008. Od stycznia 2008 roku zwiększono liczbę punktów pomiarowy rozmieszczonych na trasie zwiedzania sztolni z 4 do 12 i zrezygnowano z dozymetrii indywidualnej.



Rys. 6. Rozkład dawek rocznych pracowników trasy turystycznej w latach 2001 - 2007.

Na rysunku 7 przedstawione są pomiary średnich rocznych stężeń radonu dla trasy turystycznej i osobno dla inhalatorium od roku 2008 do 2015.



Rys 7. Średnie roczne stężenia radonu w zmierzone w pomieszczeniach trasy turystycznej i w inhalatorium.

Średnie roczne stężenie radonu za lata 2008 – 2015 wyniosło: w trasie turystycznej – 540 Bqm^{-3} , a w inhalatorium 870 Bqm^{-3} . Najwyższe zmierzone stężenie w pomieszczeniach trasy było w roku 2014 i wyniosło 690 Bqm^{-3} , a w inhalatorium w roku 2018 - 1100 Bqm^{-3} .

W roku 2010 opracowałem na zlecenie Sztolni Kowary kolejną ekspertyzę dotyczącą narażenia na radon. Wnioski zawarte w ekspertyzie były następujące:

1. Wieloletnie pomiary stężeń radonu w trasie turystycznej Sztolni Kowary wykazały, iż nie należy spodziewać się występowania w pomieszczeniach udostępnionych do zwiedzania stężeń radonu przekraczających 1000 Bqm^{-3} .
2. Pracowników trasy turystycznej i inhalatorium należy zaliczyć do kategorii B² narażenia na promieniowanie jonizujące.
3. Należy prowadzić stały pomiar długookresowych średnich stężeń radonu w wybranych punktach trasy i inhalatorium.
4. Ocenę narażenia pracowników należy prowadzić na podstawie pomiarów środowiskowych i zapisów czasu pracy w chodnikach trasy i inhalatorium.

Pomiary uzupełniające.

Oprócz opisanych powyżej badań w pomieszczeniach trasy od 2001 roku przeprowadzano kontrolne pomiary chwilowych stężeń radonu. Badania takie przeprowadziłem w roku 2001 i roku 2004 oraz w roku 2010, 2011, 2012 i 2018. Pomiary stężeń radonu wykonywałem za pomocą komórek scyntylacyjnych tzw. komórek Lucasa

Chwilowe pomiary stężenia radonu wykonano we wrześniu 2001 roku w sześciu punktach trasy turystycznej. Stężenie zmieniało się od 210 do 800 Bqm^{-3} , a średnie wyniosło $380 \pm 220 \text{ Bqm}^{-3}$.

Chwilowe pomiary stężenia radonu wykonano w czerwcu 2004 roku w pięciu punktach trasy turystycznej. Stężenie zmieniało się od 100 do 500 Bqm^{-3} , a średnie wyniosło $230 \pm 180 \text{ Bqm}^{-3}$.

Chwilowe pomiary stężenia radonu wykonano w lipcu 2010 roku w czternastu punktach trasy turystycznej. Stężenie zmieniało się od 100 do 890 Bqm^{-3} , a średnie wyniosło $480 \pm 240 \text{ Bqm}^{-3}$.

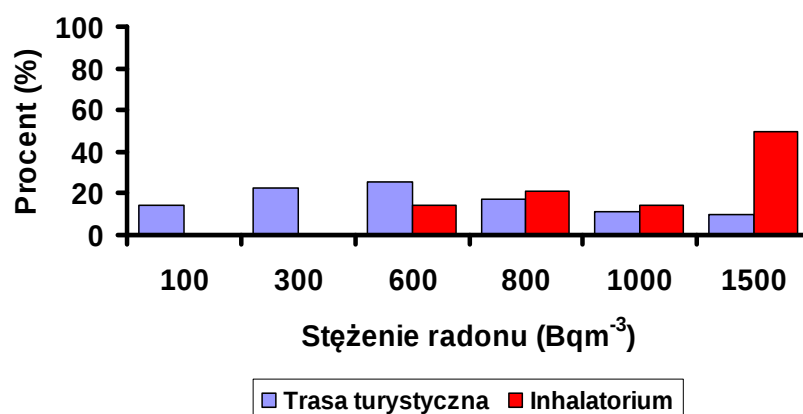
² Kategoria B narażenia na promieniowanie oznacza, że pracownik może otrzymać roczną dawkę skuteczną przekraczającą 1 mSv, ale nie powinien otrzymać dawki większej niż 6 mSv czyli nie został zaliczony do kategorii A narażenia.

Przeprowadzone w lipcu 2011 r. pomiary wykazały, że zakres stężeń chwilowych radonu zmierzonych w sztolni zawierał się w granicach od 550 do 1300 Bqm⁻³ z wartością średnią 790±260 Bqm⁻³.

Chwilowe pomiary stężenia radonu wykonano w sierpniu 2012 roku w dziewięciu punktach trasy turystycznej. Stężenie zmieniało się od 100 do 620 Bqm⁻³, a średnie wyniosło 390 ± 170 Bqm⁻³.

Ostatnie pomiary wykonano w lipcu 2018 r. w dziewięciu punktach trasy. Stężenie wahało się od 140 do 820 Bqm⁻³, a średnia wynosiła 520 ± 190 Bqm⁻³.

Na rysunku 8 pokazany jest rozkład stężeń radonu zmierzonych za pomocą komórek scyntylacyjnych. Są to tzw. pomiary chwilowe.



Rys 8. Rozkład stężeń radonu zmierzonych w pięciu seriach pomiarów chwilowych w latach 2001 – 2018.

Tak jak w przypadku pomiarów długookresowych pomiary chwilowe potwierdziły, że:

1. Należy prowadzić stały pomiar długookresowych średnich stężeń radonu w wybranych punktach trasy i inhalatorium.
2. Przeprowadzone pomiary wykazały prawidłowy dobór punktów pomiarowych dla dozymetrii środowiskowej.
3. Stężenia radonu w inhalatorium są wyższe od stężeń w trasie turystycznej

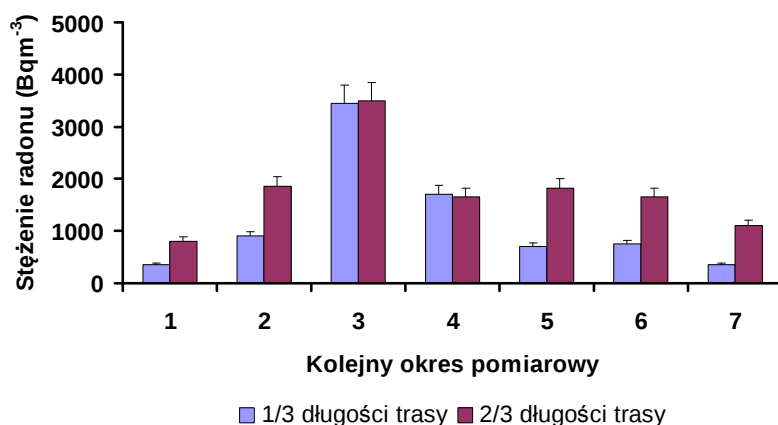
Opisane powyżej działania związane z występowaniem radonu w podziemnej trasie turystycznej mogą stanowić przykład do naśladowania dla innych tras turystycznych, szczególnie będących w fazie projektowania⁴⁵.

W latach 2004 – 2007 prowadziłem również badania w trzech podziemnych trasach turystycznych⁴⁶. Wyniki omówione zostały poniżej.

5.3. Podziemna Trasa Turystyczno-Edukacyjnej „Stara Kopalnia Uranu” w Kletnie

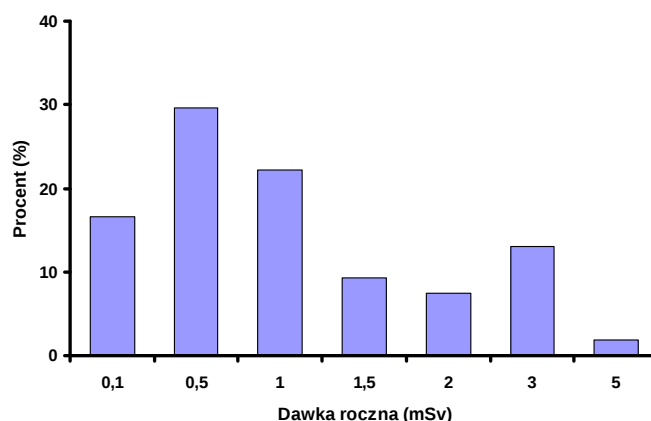
W 2002 roku udostępniona została do zwiedzania część wyrobisk byłej kopalni uranu w Kletnie w gminie Stronie Śląskie. Chodnikami zwiedzający przechodzą trasę o długości ok. 200 m, oglądając atrakcyjne wystąpienia miejscowych minerałów (fluoryt, kwarc i inne) oraz szereg specjalnych ekspozycji. Wyjście znajduje się w miejscu byłego wlotu sztolni.

W trasie turystycznej Kletno ze względu na jej długość (200 m) pomiary wykonywałem w 1/3 i 2/3 długości trasy (w punktach zatrzymywania się na dłużej przewodnika) w cyklach dwumiesięcznych ze względu na wysokie stężenia radonu. Na rysunku 9 przedstawione są pomiary wykonane w latach 2004 - 2005. Średnie stężenie w wymienionym okresie wyniosło $1500 \pm 900 \text{ Bqm}^{-3}$.



Rys 9. Wyniki pomiarów średnich dwumiesięcznych stężeń radonu w starej kopalni uranu Kletnie.

Na podstawie wykonanych pomiarów oraz danych dotyczących czasu pracy w trasie turystycznej oszacowano wielkości dawek rocznych, na jakie narażeni mogą być pracownicy trasy turystycznej. Średnia oszacowana dawka skuteczna roczna wyniosła $0,94 \pm 0,84 \text{ mSv}$. Rozkład dawek przedstawiony jest na rysunku 10.



Rysunek 10. Rozkład oszacowanych dawek w trasie turystycznej Kletno.

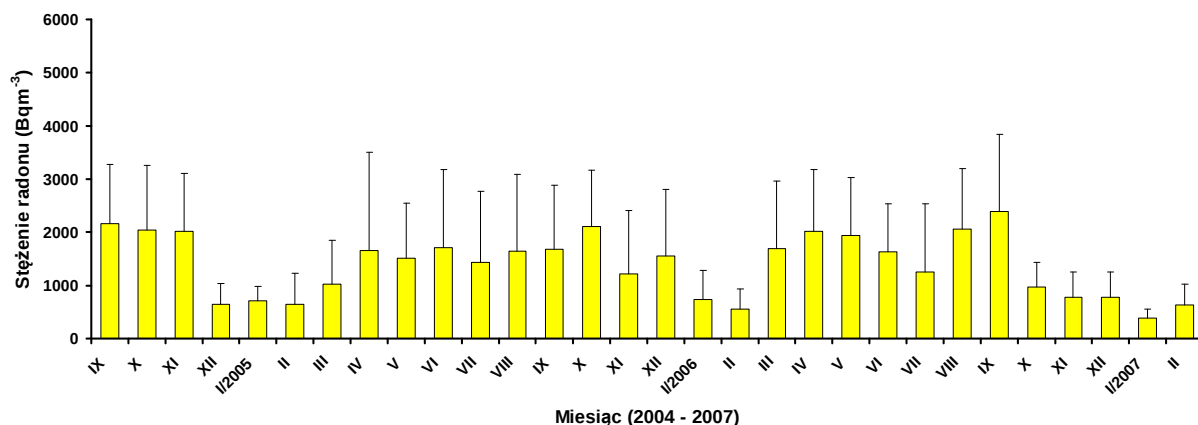
5.4. Podziemna trasa turystyczna “Złoty Stok”

Kopalnia złota w Złotym Stoku funkcjonowała aż do 1962 r., kiedy to, z niewyjaśnionych do dziś przyczyn, została definitywnie zamknięta i zlikwidowana. W maju 1996 r. otworzono Podziemną Trasę Turystyczną "Kopalnia Złota", a przy niej Muzeum Górnictwa i Hutnictwa w Złotym Stoku. Z olbrzymiego labiryntu około 300 km podziemnych korytarzy rozmieszczonych na 21 poziomach, obecnie do zwiedzania udostępnione są dwie sztolnie. Czas zwiedzania wynosi 1,5 godziny.

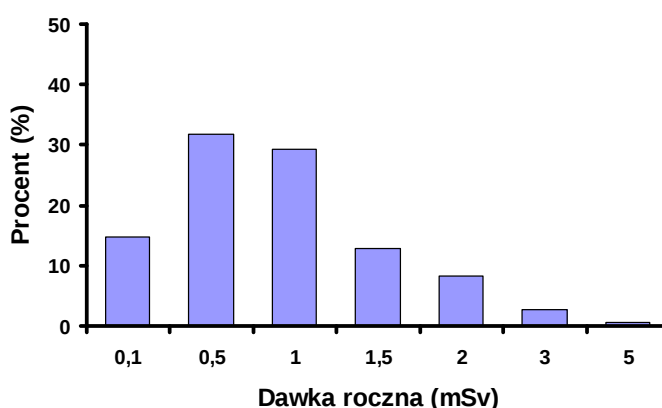
W trasie turystycznej Złoty Stok prowadziłem pomiary stężeń radonu w cyklach miesięcznych w pięciu punktach pomiarowych. Cykle miesięczne zostały wybrane ze względu na wysokie stężenia radonu. Na rysunku 11 przedstawione są średnie miesięczne pomiary stężeń radonu.

Średnie stężenie radonu w roku 2005 wyniosło 1400 Bqm^{-3} . Maksymalne miesięczne stężenia zostało zmierzone w punkcie o nazwie Gertruda – Tama i wyniosło 4900 Bqm^{-3} .

Na podstawie czasu pracy i wyników pomiarów stężeń oszacowano dawki, jakie otrzymać może pracownik zatrudniony w Złotym Stoku. Średnia oszacowana dawka skuteczna roczna wyniosła $0,70 \pm 0,60 \text{ mSv}$. Na rysunku 12 przedstawiony jest rozkład oszacowanych dawek



Rys. 11. Średnie miesięczne stężenia radonu zmierzone w trasie turystycznej „Kopalnia Złota” w latach 2005 – 2007.



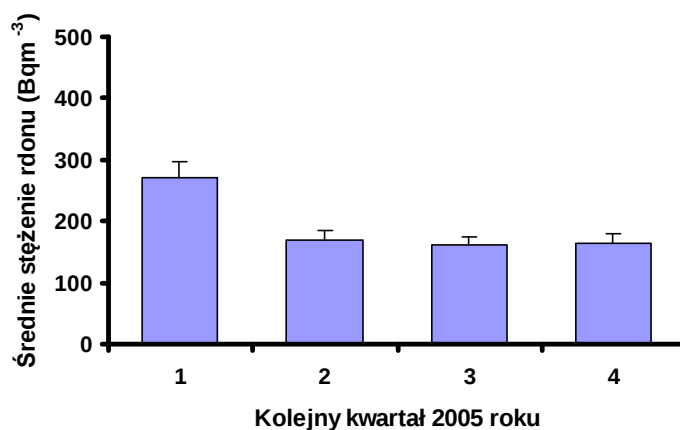
Rys. 12. Rozkład dawek oszacowany na podstawie pomiarów stężeń radonu i czasu pracy.

Jak widać z wykresu pracownicy tej trasy turystycznej mogą otrzymać dawki z zakresu od 0,01 do 5 mSv.

5.5. Podziemne miasto (kompleks) Osówka w Głuszycy

Podziemny Kompleks Osówka w Głuszycy znajduje się niewiele ponad kilometr na północny-wschód od miejscowości Kolce i takiej samej odległości na północ od miejscowości Sierpnica. Prace rozpoczęto tutaj w połowie 1943 r. Doprowadziły one do powstania ogromnego systemu betonowych korytarzy, umocnień i hal. Cel prac był utrzymywany w tajemnicy. Zdaniem jednych miała to być tajna kwatera Adolfa Hitlera. Osówkę zwiedza się w kaskach, z przewodnikiem, zwiedzanie trwa 1 godz.

W trasie turystycznej Podziemne Miasto Osówka prowadzone były okresowe pomiary stężeń radonu w czterech miejscach pomiarowych. Pomiary realizowane są w cyklach kwartalnych. Rysunek nr 13 przedstawia rozkład zmierzonych stężeń radonu.



Rys 13. Średnie kwartalne stężenia radonu

Średnie stężenie radonu za rok 2005 wyniosło $200 \pm 100 \text{ Bqm}^{-3}$. Taki poziom stężenia radonu powoduje, iż pracownicy zatrudnieni w tej trasie turystycznej nie są narażeni na przekroczenie dawki rocznej w wysokości 1 mSv.

6. Pomiary rozpoznawcze w podziemnych trasach turystycznych

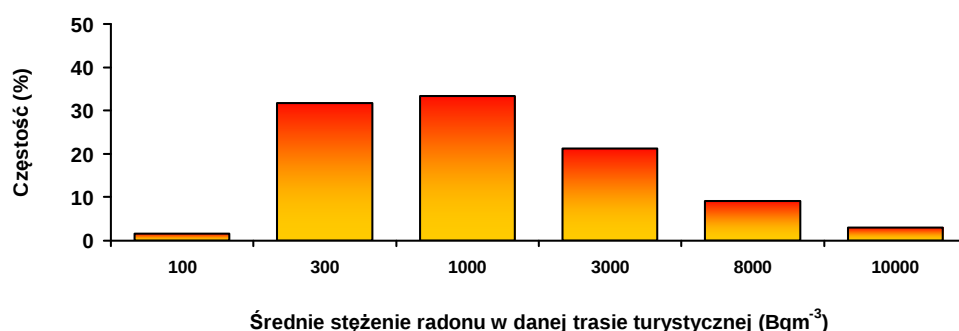
W roku 2012 wykonałem w podziemnych trasach turystycznych pomiary okresowych stężeń radonu za pomocą dozymetrów zamkniętych opisanych w rozdziale 3.

Do badań wytypowałem 100 tras turystycznych, czyli wszystkie, które zostały umieszczone w książce „Przewodnik po Polsce. Podziemne trasy turystyczne”⁴⁷. Ze 100 wytypowanych podziemnych tras turystycznych do IMP odesłano dozymetry z 66 tras. W pozostałych 34 trasach nie przeprowadzono pomiarów z następujących powodów: zaginięcie dozymetrów (11 tras), odmowa rozmieszczenia dozymetrów bądź odesłanie dozymetrów z adnotacją „nie ekspozowano” (14 tras) oraz brak informacji o wysłanych dozymetrach (9 tras). Przebadano 25 tras naturalnych (jaskinie, groty) i 41 tras sztucznych (budowle, kopalnie). W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano 259 pomiarów stężenia radonu⁴⁸. Średnia arytmetyczna wyników wynosi 1610 Bqm^{-3} , a maksymalne zmierzone stężenie – ponad 20 tys. Bqm^{-3} w Kopalni Złota w Złotym Stoku. Stężenie minimalne określone jest przez próg czułości metody pomiarowej⁴⁹ i wynosi 100 Bqm^{-3} . Wyniki zbiorcze przedstawione są w tabeli 1

Pomiary stężenia radonu przeprowadzone w podziemnych trasach turystycznych wykazały, że jego występowanie może stanowić realne zagrożenie dla zdrowia pracowników. Na rysunku 14 przedstawiony jest rozkład średnich stężeń radonu dla danej trasy podziemnej.

Tabela 1. Wyniki miesięcznych pomiarów stężeń radonu w podziemnych trasach turystycznych

L.p.	Typ trasy turystycznej	Liczba przebadanych tras	Średnie stężenie radonu [Bqm ⁻³]	Maksymalne stężenie radonu [Bqm ⁻³]
1	Wszystkie	66	1610	20980
2	Naturalne trasy podziemne	25	1310	4640
3	Jaskinie	21	1390	4640
4	Grotty	4	740	2600
5	Sztuczne trasy podziemne	41	1720	20980
6	Kopalnie	16	3030	20980
7	Budowle militarne	15	930	5660
8	Budowle miejskie	10	590	2460



Rys. 14. Rozkład średnich arytmetycznych stężeń radonu zmierzonych we wszystkich podziemnych trasach turystycznych.

Średnie arytmetyczne pomiarów dla poszczególnych tras pokazały, że tylko w jednej z nich stężenie radonu było poniżej progu czułości, natomiast w 67% tras przekroczyło wartość 300 Bqm⁻³.

Badania pokazały, co następuje:

1. W przeważającej większości tras podziemnych zmierzone stężenie znacznie przekraczało 300 Bqm⁻³ (poziom referencyjny proponowany przez Radę Europy). W 33% przebadanych tras średnia arytmetyczna zmierzonych stężeń przekroczyła 1000 Bqm⁻³.
2. Radon występujący w podziemnych trasach turystycznych dla wielu z nich może stanowić problem organizacyjno-prawny.

3. Należy opracować program działań mający na celu obniżenie stężenia radonu w trasach podziemnych, szczególnie powstałych w byłych kopalniach.
4. Należy prowadzić roczne pomiary stężenia radonu, szczególnie w trasach, w których jest ono podwyższone.
5. Liczba podziemnych tras turystycznych w Polsce systematycznie wzrasta (obecnie jest ich około 240), należy, więc kontynuować pomiary stężenia radonu w kolejnych trasach.

7. Uzdrowiska i SPA

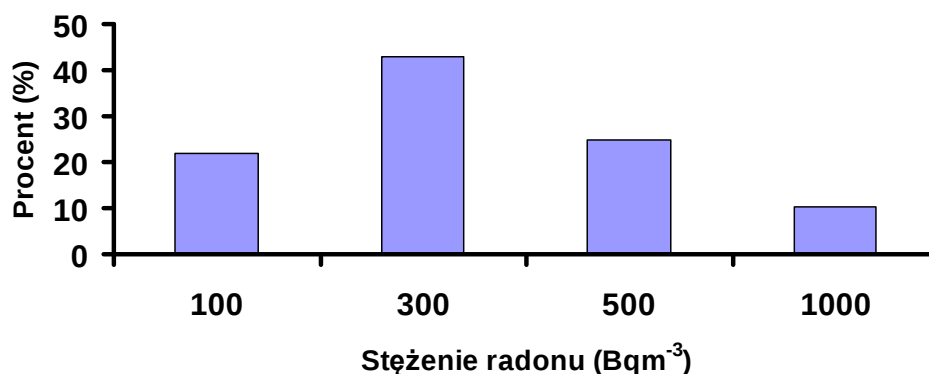
W wielu polskich uzdrowiskach można znaleźć wody mineralne zawierają radon gazu radioaktywnego (^{222}Rn). Te wody są zarówno butelkowane lub używane podczas zabiegów balneoterapeutycznych (kąpiele, woda procedury, inhalacje). Podczas wszystkich tych procedur radon który jest gazem szlachetnym, może łatwo penetrować otoczenie przez naturalną dyfuzję. Jak już wspomniano obecność radonu w powietrzu może spowodować zagrożenie promieniowaniem jonizującym personelu pracującego w uzdrowiskach.

Pierwsze, zakrojone na szeroką skalę pomiary narażenia pracowników uzdrowisk na radon Instytut Medycyny Pracy w Łodzi przeprowadził w latach 1977 – 1987. Do pomiarów wykorzystano detektory śladowe oraz radiometry górnicze. Po zakończeniu pomiarów oszacowano na jakie ekspozycje roczne narażeni są pracownicy 25 uzdrowisk⁵⁰. I tak średnia ekspozycja dla przebadanych uzdrowisk to $0,31 \text{ mJhm}^{-3}$ ($0,087 \text{ WLM}$) a maksymalna $1,56 \text{ mJhm}^{-3}$ ($0,444 \text{ WLM}$).

W latach późniejszych w niektórych uzdrowiskach kontynuowane były pomiary stężeń pochodnych radonu.

Do chwili obecnej uzdrowisko Świeradów jest jedynym polskim uzdrowiskiem, w którym od wielu lat prowadzona jest systematyczna kontrola stężenia radonu i jego pochodnych. Pomiary wykonywane są za pomocą dozymetrów pasywnych rozmieszczonych w kilku miejscach uzdrowiska (basen, kabiny kąpielowe, inhalatorium). Dozymetry rozmieszczane są na okres jednego miesiąca cztery razy w roku, co kwartał. Na rysunku nr 15 przedstawiony jest rozkład zmierzonych stężeń radonu w latach 2002 – 2018. (pomiary wykonywane przeze mnie) Zakładając 2000 godzin pracy oraz średnie stężenia roczne występujące w ostatnich 17 latach pomiarowych tzn. od 2002 do 2018 wyliczyłem dawki roczne, jakie mogły otrzymać osoby pracujące w Uzdrowisku Świeradów. Tak jak poprzednio przyjąłem podany przez UNSCEAR 2000 współczynnik konwersji ekspozycji na dawkę równy

9nSv/Bq·m⁻³h. Roczne dawki skuteczne mogły zawierać się w granicach od 2,2 mSv (2011) do 14,1 mSv (2007). Ze względu na specyficzny system pracy w uzdrowisku oszacowanie dawki skutecznej może być obarczone dużym błędem. Najlepszym rozwiązaniem byłoby wprowadzenie systemu dozymetrii indywidualnej.



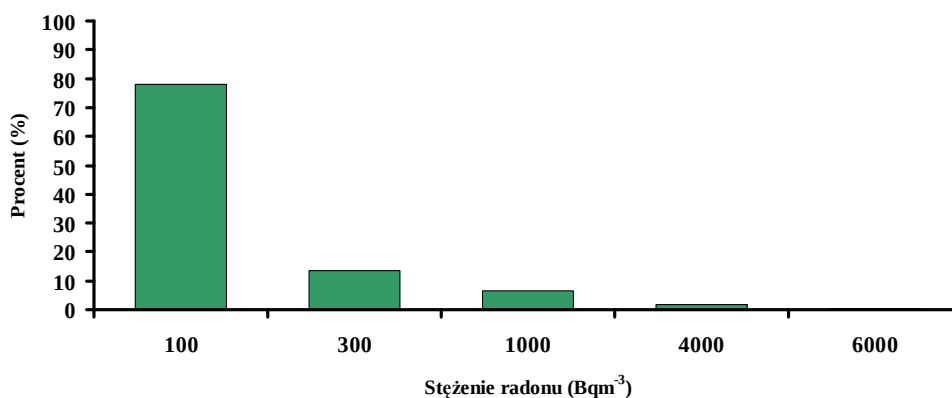
Rys. 15. Rozkład średnich miesięcznych stężeń radonu zmierzonych w latach 2002 - 2018

Dwadzieścia lat później zaproponowałem przeprowadzenie podobnych pomiarów, rozszerzając je na wszystkie uzdrowiska (sanatoria) I tak w roku 2007 wysłano do 101 uzdrowisk polskich po 5 dozymetrów pasywnych zamkniętych z detektorem śladowym CR-39. Badaniami objęto cały kraj⁵¹. W tabeli 2 zamieszczone są podstawowe dane dotyczące realizowanych badań. Dozymetry eksponowane były przez 1 miesiąc. Na rysunkach 16 i 17 przedstawione są rozkłady stężeń radonu dla wszystkich pomiarów jak i średnich dla danego uzdrowiska.

Tabela 2. Dane podstawowe dotyczące przeprowadzonych badań.

L.p.	Wielkość charakteryzowana	Liczba
1	Dozymetry wysłane do uzdrowisk	505
2	Uzdrowiska, które otrzymały dozymetry do badań	101
3	Uzdrowiska, które odesłały dozymetry	81
4	Uzdrowiska, które nie eksponowały dozymetrów	5
5	Uzdrowiska, które brały udział w badaniu	76

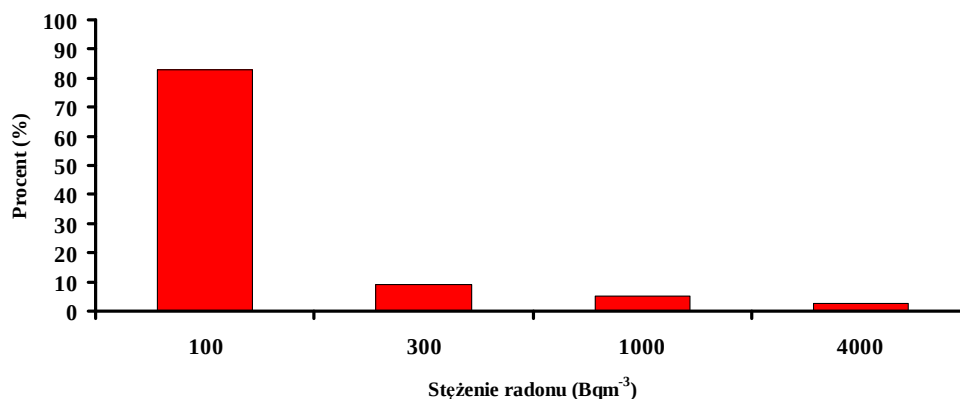
W 63 uzdrowiskach (83% przebadanych) średnie stężenie radonu było poniżej 100 Bqm^{-3} . W tych uzdrowiskach nie ma problemu radonu i zagrożenia przez niego powodowanego.



Rys 16. Rozkład wszystkich pomiarów stężeń radonu wykonanych w uzdrowiskach

W pozostałych uzdrowiskach rozkład stężeń wyglądał następująco:

Przekroczenie 100 Bqm^{-3} zaobserwowano w 13 uzdrowiskach z tym, że w 6 z nich zmierzono stężenia przekraczające 300 Bqm^{-3} . Zestawienie wyników pomiarów dla najwyższych zmierzonych stężeń zamieszczone jest w tabeli 3.



Rys 17. Rozkład średnich stężeń radonu zmierzonych dla danego uzdrowiska.

Przekroczenie wielkości stężenia radonu w powietrzu wynoszące, 300 Bqm^{-3} może być istotne z punktu widzenia ochrony radiologicznej, w szczególności przy braku świadomości o istnieniu potencjalnego zagrożenia od radonu. Łącznie problem ekspozycji na radon w polskich uzdrowiskach może dotyczyć około 160 osób.

Tabela 3. Wyniki pomiarów stężeń radonu w uzdrowiskach gdzie stwierdzono przekroczenie 300 Bqm⁻³

L.p.	Nazwa uzdrowiska	Miesięczne stężenie aktywności radonu w powietrzu [Bqm ⁻³]		
		Średnie	Maksymalne	Minimalne
1	Uzdrowisko „Świeradów – Czerniawa” Sp. z o.o. Świeradów - Zdrój	3370	13960	350
2	Uzdrowisko „Lądek – Długopole” S.A. Lądek Zdrój	900	2180	50
3	Sanatorium Uzdrowskie „Moniuszko” Duszniki Zdrój	420	530	250
4	Sanatorium Uzdrowskie „Złocień” Ustroń	290	660	60
5	Szpital Uzdrowski dla Dzieci Świeradów Zdrój	380	530	300
6	Sanatorium Uzdrowskie „Chemik” NZOZ Duszniki Zdrój	180	560	50

Ośrodki typu SPA

W 2013 roku zmierzyłem stężenia radonu nad powierzchnią wód geotermalnych w 9. polskich ośrodkach SPA, które wykorzystują wody geotermalne w celach wypoczynkowych i leczniczych celów (kilka SPA nie pozwoliło wykonać pomiarów)⁵². Osiem z badanych ośrodków używa wody geotermalne w basenach i jacuzzi. W jednym z uzdrowisk, do stosowania terapeutycznego wód geotermalnych stosowane są wanny wypełnione wodą geotermalną. W większości SPA są baseny wypełnione wodą termalną. Pomiary wykonano za pomocą komórek scyntylicyjnych Lucasa opisanych wcześniej. Próbki pobierano w strefie oddychania pracowników.

Stężenie radonu w większości punktach pomiarowych, z wyjątkiem jednego było poniżej dolnej granicy wykrywalności komórek scyntylicyjnych Lucas, czyli 100 Bqm⁻³. Oznacza to, że maksymalna dawka, która może być odbierana przez personel w badanych uzdrowiskach geotermalnych nie jest wyższa niż 0,6 mSv/rok. Tylko w jednym z badanych uzdrowisk, stężenie radonu mieściło się w zakresie 130 - 530 Bqm⁻³, a więc szacowana roczna dawka dla pracowników może być z zakresu 0,8 - 3,4 mSv.

8. Ocena zawodowego narażenia w wyniku ekspozycji na radon w podziemnych trasach turystycznych, uzdrowiska i SPA.

Rewolucyjne podejście do problemu, jakim jest występujący powszechnie w przyrodzie promieniotwórczy gaz radon, zaprezentowane w dyrektywie Unii Europejskiej, DYREKTYWA RADY 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 r., będzie miało duże konsekwencje społeczne i ekonomiczne. Pierwsza ze zmian zapisanych w dyrektywie to zrównanie w sensie prawnym narażenia na wszystkie rodzaje promieniowania występującego w przyrodzie. Oznacza to, że należy tak samo traktować pracę wymagającą przebywania w obecności radonu w powietrzu, jak i pracę w elektrowni atomowej. Są tylko trzy wyjątki zapisane w dyrektywie, do których nie stosują się zasady w niej umieszczone. A mianowicie: a) narażenia na naturalne promieniowanie, na przykład od nuklidów promieniotwórczych występujących w ciele ludzkim oraz od promieniowania kosmicznego występującego na poziomie ziemi; b) narażenia osób z ogółu ludności lub pracowników innych, niż członkowie załóg statków powietrznych i kosmicznych, na promieniowanie kosmiczne podczas lotu lub w przestrzeni kosmicznej; c) narażenia nad powierzchnią ziemi na nuklidy promieniotwórcze obecne w nienaruszonej skorupie ziemskiej.

Z występowaniem promieniowania jonizującego, które odkryte zostało ponad sto lat temu, wiążą się dwa zagadnienia.

1. Pierwsze zagadnienie to działania mające na celu zminimalizowanie skutków oddziaływania promieniowania, czyli szeroko rozumiana ochrona przed promieniowaniem jonizującym.
2. Drugie to oddziaływanie negatywne na organizm człowieka, czyli szeroko rozumiane choroby wywoływane przez promieniowanie jonizujące od oparzenia po nowotwory prowadzące do zgonu.

8.1. Ochrona radiologiczna

Ochrona radiologiczna – jest to zapobieganie narażeniu ludzi i skażeniu środowiska, a w przypadku braku możliwości zapobieżenia takim sytuacjom – ograniczenie ich skutków to poziomu tak niskiego, jak tylko jest to rozsądnie osiągalne, przy uwzględnieniu czynników ekonomicznych, społecznych i zdrowotnych.

Zadania ochrony radiologicznej - zapobieganie efektom deterministycznym oraz ograniczenie prawdopodobieństwa wystąpienia efektów stochastycznych.

Założenia ochrony radiologicznej - każda ilość promieniowania jest szkodliwa.

Jednym z istotnych elementów ochrony radiologicznej jest system limitacji dawek granicznych. Dawka promieniowania jest to ilość energii promieniowania pochłoniętej przez dany obiekt. Dawka graniczna, określona w przepisach wartość, która ogranicza z dołu zakres dawek niedopuszczalnych. W ochronie radiologicznej najistotniejsze są: dawka skuteczna (efektywna) i dawka równoważna.

Dawka skuteczna (efektywna): jest to suma dawek równoważnych pochodzących od zewnętrznego i wewnętrznego narażenia wyznaczona z uwzględnieniem odpowiednich współczynników wagowych narządów i tkanek, obrazująca narażenie całego ciała.

Dawką równoważną nazywamy dawkę pochłoniętą w tkance lub narządzie T, z uwzględnieniem rodzaju promieniowania (alfa, beta, gamma i inne).

W skrócie system limitacji można opisać w sposób następujący:

Dawki skuteczne (efektywne)

1. Dawka graniczna roczna dla pracownika pracującego z promieniowaniem - 20 mSv
2. Zaliczenie pracownika do kategorii A narażenia na promieniowanie następuje po przekroczeniu dawki 6 mSv.
3. Dawka graniczna dla ogółu ludności w roku - 1 mSv.

Dawki równoważne

1. Dawka graniczna dla pracownika na soczewki oczu - 150 mSv rocznie.
2. Dawka graniczna dla pracownika na skórę i kończyny - 500 mSv rocznie

Limitowane są również dawki równoważne dla soczewek oczu i skóry dla ogółu ludności.

Zrównanie narażenia na promieniotwórczy gaz radon z narażeniem na promieniowanie z innych źródeł wymaga opracowania algorytmu umożliwiającego przeliczenie ekspozycji na radon i jego pochodne na dawkę skuteczną (ekwiwalentną).

Podczas oddychania powietrzem zawierającym radon i jego radioaktywne pochodne następuje proces osadzania się pochodnych radonu w płucach, co powoduje napromienienie komórek wyściełających płuca.

Znając stężenie pochodnych radonu panujące w określonym czasie można wyliczyć ekspozycję.

Stężenie energii potencjalnej promieniowania alfa C_α jest to suma energii cząstek alfa jaka zostaje wyemitowana podczas całkowitego rozpadu promieniotwórczego $3,7 \text{ kBq}$ krótkożyciowych pochodnych radonu zawartych w jednostce objętości powietrza. Jednostką stężenia w układzie SI jest $[\text{Jm}^{-3}]$; Tradycyjną jednostką stężenia jest 1 WL (Working Level).

$$1\text{WL} = 2,1 \times 10^{-5} \text{Jm}^{-3}$$

Jednostką ekspozycji na pochodne radonu w układzie SI jest $[\text{Jhm}^{-3}]$; jednostką tradycyjną jest 1WLM (Working Level Month). Zależność pomiędzy tymi jednostkami jest następująca:

$$1\text{WLM} = 3,51 \text{mJhm}^{-3}$$

W przypadku znajomości wyłącznie średnich stężeń radonu w jakich przebywała osoba oraz czasu przebywania można wyliczyć ekspozycję stosując współczynniki podane w literaturze⁵³

Przykładowo:

Roczna praca (2000 godzin) przy obecności w powietrzu radonu o stężeniu 300 Bqm^{-3} powoduje, że płuca otrzymały ekspozycję w wysokości: 0,378 WLM.

Roczne przebywanie (7000 godzin) w mieszkaniu w którym średnie roczne stężenie wynosi 230 Bqm^{-3} naraża na ekspozycję równą 1 WLM

Informacją, jaką dysponować będzie właściciel podziemnej trasy turystycznej, to średnie roczne stężenie radonu w pomieszczeniach trasy i czas pracy przewodników i innych osób obsługi trasy, lub roczne ekspozycje na radon i pochodne w przypadku dozymetrii indywidualnej.

Należy zadać sobie pytanie, co ta informacja daje pracodawcy czy inspektorowi ochrony radiologicznej, których zadaniem jest optymalizacja ochrony radiologicznej w miejscu pracy. Otóż nic, ponieważ jak już było powiedziane system ochrony radiologicznej oparty jest o dawkę skuteczną (efektywną) lub dawkę równoważną podaną w mSv. Wobec tego należy zastosować odpowiedni przelicznik ekspozycji na dawkę skuteczną. Nie ma limitów na dawkę równoważną na płuca. Wobec tego należy wszelkie działania oprzeć o znajomość dawki

skutecznej. Do przeliczenia ekspozycji na radon i pochodne na dawkę skuteczną stosuje się odpowiednie współczynniki. Niestety, współczynniki podawane przez różne gremia naukowe różnią się od siebie i to czasami dość znacznie.

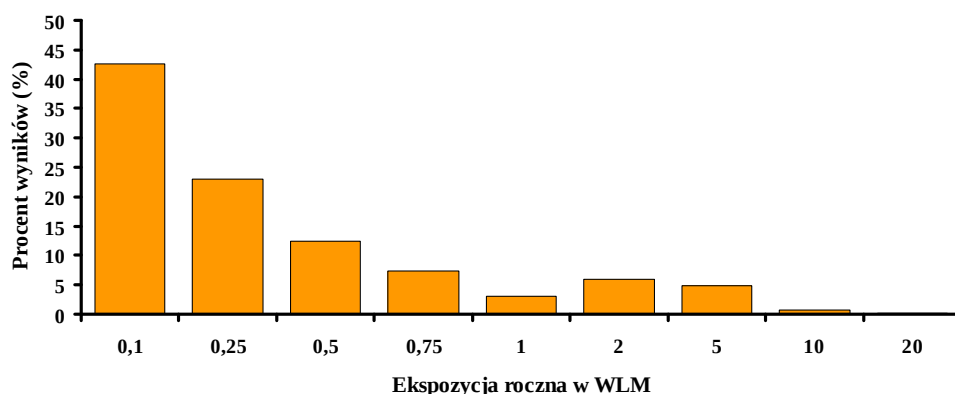
Poniżej zamieszczona jest tabela nr 4 współczynników przeliczeniowych opublikowania w publikacji ICRP 115⁵⁴.

Jaki wpływ na działania związane z ochroną radiologiczną będzie miało zastosowanie przyjętego współczynnika.

Biorąc za punkt wyjścia pomiary stężeń radonu wykonane w 66 podziemnych trasach turystycznych oraz dane o pracy przewodników oszacowano prawdopodobny rozkład ekspozycji, na jakie narażeni będą pracownicy tras. Rozkład ten przedstawiony jest na rys 18.

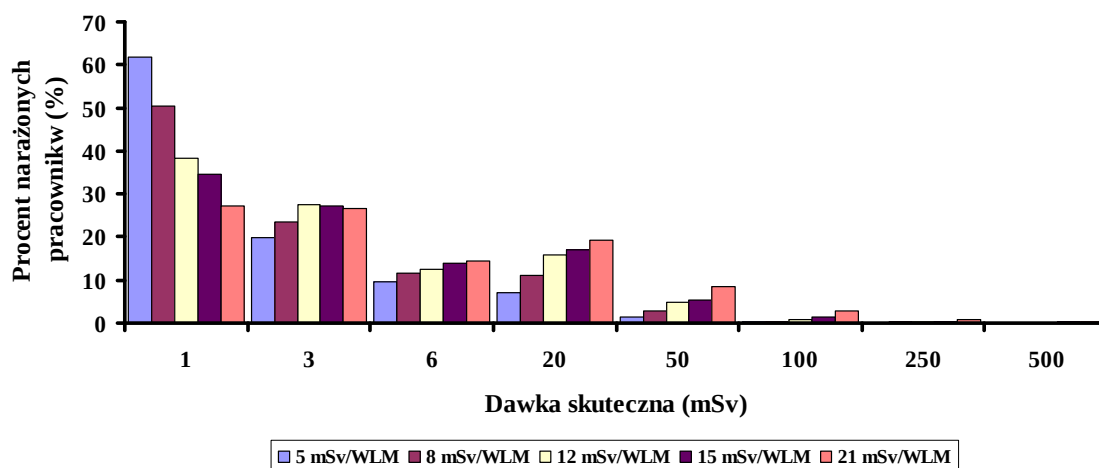
Tabela nr 4. Współczynniki przeliczeniowe ekspozycji na radon na roczne dawki efektywne.

Publikacja	Miejsce ekspozycji	Dawka efektywna (mSv na WLM)	Dawka efektywna [mSv na (mJh/m ³)]
ICRP (1987)	W pomieszczeniu	6.4	1.8
	Na zewnątrz	8.9	2.5
UNSCEAR (2000)	W pomieszczeniu i na zewnątrz	5.7	1.6
Harley i in. (1996)	W pomieszczeniu i w kopalniach	9.6	2.7
Porstendörfer (2001)	W pomieszczeniu	8	2.3
	Miejsce pracy	11.5	3.2
	Na zewnątrz	10.6	3.0
Winkler-Heil i Hofmann. (2002)	W pomieszczeniu	7.6	2.1
Winkler-Heil i in. (2007)	Kopalnie	8.9	2.5
Marsh i Birchall (2000)	W pomieszczeniu	15	4.2
James i in. (2004)	Kopalnie	20.9	5.9
	W pomieszczeniu	21.1	6.0
Marsh i in. (2005)	Kopalnie	12.5	3.5
	W pomieszczeniu	12.9	3.6



Rys. 18. Rozkład ekspozycji oszacowanych na podstawie danych pomiarowych i informacji o czasie pracy pracowników podziemnych tras turystycznych, uzdrowisk i SPA.

Przeanalizuję poniżej wpływ wielkości współczynnika na zakres ochrony radiologicznej konieczny do zastosowania w podziemnych trasach turystycznych. Na rysunku 19 pokazane są rozkłady dawek ekspozycyjnych dla podziemnych tras turystycznych w zależności od przyjętego współczynnika konwersji.



Rys 19. Rozkład dawek skutecznych w zależności od współczynnika konwersji.

Przykładowo dla podziemnej trasy turystycznej, gdzie stężenia radonu zawierają się w granicach od dwóch do trzech poziomów referencyjnych (od 600 do 900 Bqm⁻³) pracownicy trasy w zależności od przyjętego współczynnika konwersji mogą być zaliczeni do kategorii B lub A narażenia na promieniowanie. Z punktu widzenia ochrony radiologicznej niesie to za

sobą konkretne konsekwencje finansowe i społeczne. Wobec powyższego, jaki współczynnik należy zastosować?

Ochrona radiologiczna w świetle nowych zaleceń ICRP

Po około roku od ukazania się 126 publikacji ICRP,⁵⁵ podczas spotkania Głównej Komisji ICRP (13-17, 2015 – Sydney, Australia) zaproponowano zarekomendowanie jednego współczynnika przeliczeniowego ekspozycji na radon na dawkę ekspozycyjną. I tak wg przedstawionych zaleceń ekspozycja 1 WLM ($3,4 \text{ mJhm}^{-3}$) spowoduje otrzymanie dawki 12 mSv. Na rysunku 19 (powyżej) zamieszczony jest między innymi rozkład dawek ekspozycyjnych dla współczynnika a wynoszącego 12mSv/WLM.

Jak widać z powyższego wykresu istnieje, dla zaproponowanego współczynnika, możliwość przekroczenia przez pracowników limitu dawki rocznej (20 mSv) czy nawet dawki pięcioletniej (100 mSv).

Dlatego tak ważnym zagadnieniem, którego rozwiązanie powinno nastąpić przed wprowadzeniem zaleceń Dyrektywy jest przyjęcie jednego (maksymalnie 2) współczynników mSv/WLM dla celów realizacji ochrony radiologicznej związanej z występowaniem radonu.

Zrównanie, pod względem ochrony radiologicznej, pracy w obecności radonu z pracą z pierwiastkami promieniotwórczymi niesie za sobą inne, dość zaskakujące, implikacje, szczególnie dla pracowników i właścicieli podziemnych tras turystycznych.

Jak już wspomniano ochrona radiologiczna jest to cały system działań mających na celu zapewnienie jak najbezpieczniejszej pracy z promieniowaniem jonizującym emitowanym przez pierwiastki promieniotwórcze (rad, radon, cez, kobalt itd.) czy urządzenia wytwarzające takie promieniowanie jak na przykład lampy rentgenowskie.

Jednym z istotnych elementów ochrony radiologicznej jest tzw. teren nadzorowany i teren kontrolowany. Według zapisów w Prawie atomowym:

- 1) tereny kontrolowane to takie tereny, gdzie istnieje możliwość otrzymania dawek określonych dla pracowników kategorii A³, istnieje możliwość rozprzestrzeniania się skażeń promieniotwórczych lub mogą występować duże zmiany mocy dawki promieniowania jonizującego;
- 2) tereny nadzorowane, tam, gdzie istnieje możliwość otrzymania dawek określonych dla pracowników kategorii B i które nie zostały zaliczone do terenów kontrolowanych.

³ Kategoria A narażenia na promieniowanie oznacza, że pracownik może otrzymać roczną dawkę skuteczną przekraczającą 6 mSv.

Wobec powyższego, jaka jest sytuacja w podziemnych trasach turystycznych. Analizując dane otrzymane w trakcie opisanych wcześniej badań porównawczych można stwierdzić, że w 14 trasach należy wprowadzić teren kontrolowany. Konsekwencja wprowadzenia terenu kontrolowanego to: konieczność oznaczenia znakami ostrzegawczymi, ograniczenie dostępu poprzez zastosowanie bram, blokad itp. Należy wprowadzić na terenie kontrolowanych dozymetrię indywidualną, a pracowników objąć specjalistycznymi badaniami lekarskimi.

I jeszcze jeden aspekt nowych przepisów dotyczących radonu.

Do tej pory narażenie na radon było traktowane w sposób dość niefrasobliwy. Przejmowano, że w Polsce – podobnie, jak w wielu krajach europejskich – narażenie od źródeł naturalnych stanowi 73,6% całkowitego narażenia radiacyjnego, a wyrażone jako tzw. dawka skuteczna – wynosi ok. 2,433 mSv/rok. Największy udział w tym narażeniu ma radon i produkty jego rozpadu, od których statystyczny mieszkaniec Polski otrzymuje dawkę wynoszącą ok. 1,201 mSv/rok. Należy również zaznaczyć, że narażenie statystycznego mieszkańca Polski od naturalnych źródeł promieniowania jest około 1,5-2 razy niższe niż mieszkańca Finlandii, Szwecji, Rumunii, czy Włoch.

Narażenie statystycznego mieszkańca Polski w 2015 r. od źródeł promieniowania stosowanych w celach medycznych, głównie w diagnostyce medycznej obejmującej badania rentgenowskie oraz badania *in vivo* (tj. podawanie pacjentom preparatów promieniotwórczych), szacuje się na 0,860 mSv. Na dawkę tę składają się przede wszystkim dawki otrzymywane przy badaniach, w których stosowano tomografię komputerową (0,33 mSv) oraz radiografię konwencjonalną i fluoroskopię (0,38 mSv). Za rocznym raportem prezesa PAA za 2017 r.¹

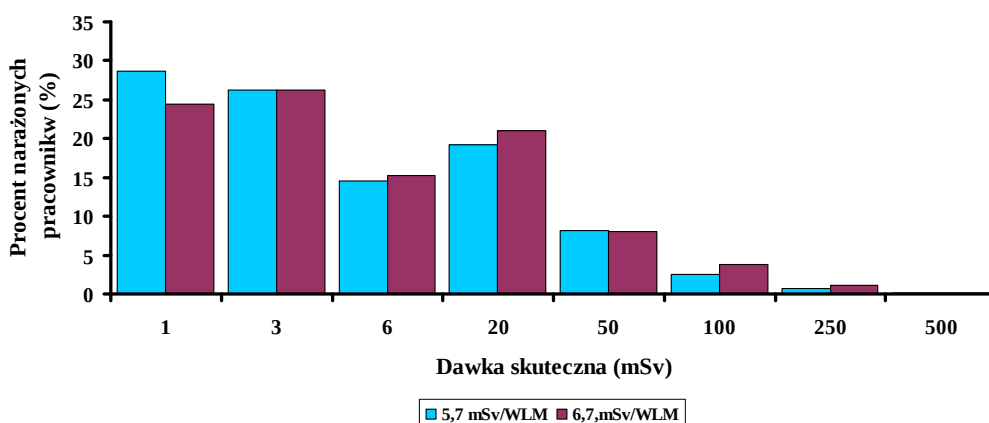
Jakby tego było mało w styczniu 2018 roku ukazało się podsumowanie zaleceń ICRP dotyczących radonu. Cytowana w tym opracowaniu publikacja ICRP 137 Zajęciowe wykorzystanie radionuklidów: część 3.⁵⁶

W opracowaniu tym stwierdzono, że chociaż ochrona przed radonem opiera się głównie na pomiarze i kontroli poziomów ekspozycji, w pewnych sytuacjach dla pracowników wymagane są szacunkowe dawki. Szacunki dotyczące dawki mają wartość dla celów ochrony, gdy pracownicy są narażeni na więcej niż jedno źródło promieniowania, jak ma to miejsce w przypadku górników podziemnych.

Podano również współczynniki przeliczeniowe dla podziemnych tras turystycznych. I tak stwierdzono że: w przypadku jaskiń turystycznych i miejsc pracy w pomieszczeniach, w których zakłada się, że pracownicy spędzają dwie trzecie czasu w ruchu, współczynniki dawki wynoszą odpowiednio 6,7 i 5,7 mSv na mJhm⁻³.

Wróćmy wobec powyższego do przeanalizowanego wcześniej wpływu wielkości współczynnika na zakres ochrony radiologicznej konieczny do zastosowania w podziemnych trasach turystycznych. Na rysunku 20 pokazany jest rozkład dawek ekspozycyjnych dla współczynników podanych w publikacji ICRP 137.

Zastosowanie powyższych współczynników jeszcze zwiększa zakres dawek na jakie narażeniu mogą być pracownicy podziemnych tras turystycznych. Powyższe dane potwierdzają fakt, iż nowe potraktowanie narażenia na radon może bardzo skomplikować działanie podziemnych tras turystycznych, których w Polsce jest około 240, a liczba zatrudnionych tam pracowników znacznie przekracza 1000 osób.



Rys. 20. Rozkład dawek ekspozycyjnych, jakie mogą otrzymać pracownicy podziemnych tras turystycznych dla współczynników z publikacji 137 ICRP.

Jak widać z powyższego, opracowanie odpowiednich przepisów prawnych będzie bardzo istotnym elementem regulującym postępowanie w przypadku podziemnych tras turystycznych.

Przepisy te muszą regulować postępowanie zarówno podczas uruchamiania nowych tras jak i podczas ich normalnej eksploatacji. Uregulowania wymagać będzie zarówno system pracy w podziemnych trasach oraz system kontroli narażenia na radon zarówno pracowników jak i turystów.

Przepisy prawne będą musiały uwzględniać fakt, że pracownicy podziemnych tras turystycznych będą zaliczani do pracowników pracujących z promieniowaniem. Tym samym powinny ich obowiązywać przepisy dotyczące ochrony radiologicznej podobnie jak np. w przypadku medycyny nuklearnej.

System ochrony radiologicznej w przypadku radonu powinien mieć możliwość elastycznego dostosowania wymagań do konkretnej trasy turystycznej. Oczywiście generalne zasady muszą być zachowane, a są to:

1. Pracownicy podziemnych tras turystycznych są zawodowo narażeni na promieniowanie jonizujące
2. W zależności od stopnia zagrożenia należy zaliczyć pracowników do kategorii A lub B narażenia na promieniowanie
3. Pracownicy objęci będą kontrolą dawek indywidualnych w zależności od kategorii narażenia.
4. Pracownicy podziemnych tras turystycznych objęci są kontrolą lekarską i przechodzą badania dopuszczające do pracy z promieniowaniem

Uregulowany prawnie musi też być system uruchamiania podziemnych tras turystycznych. System ten musi bezwzględnie wymuszać konkretne działania polegające między innymi na rozpoznaniu występujących w danej trasie turystycznej stężeń radonu. Opracowane muszą zasady prowadzenia pomiarów i dokonywania oceny stopnia narażenia na radon. Uregulowany musi być zakres postępowania w zależności od otrzymanych wyników i rodzaju trasy turystycznej.

W przypadku uzdrowisk czy SPA uregulowania prawne muszą, w podobnym stopniu tak jak pracowników podziemnych tras turystycznych, dotyczyć pracowników tych jednostek.

8.2. Ryzyko utraty zdrowia

Drugim zagadnieniem związanym z występowaniem radonu i jego oddziaływaniem na organizm człowieka jest ryzyko zaindukowania nowotworu, a w konsekwencji zgonu.

Zaliczenie radonu do czynnika powodującego wystąpienie ryzyka zawodowego przyniesie również zmiany w obowiązkach i postępowaniu pracodawcy.

Informacja o ryzyku zawodowym jest bardzo ważnym elementem każdego stosunku pracy. Pracodawca ma obowiązek powiadomienia pracowników (przed przystąpieniem do pracy) o

zagrożeniach występujących na określonych stanowiskach. Ocena ryzyka służy nie tylko zapewnieniu bezpieczeństwa w zakładzie pracy, ale także zapobieganiu wypadkom przy pracy oraz chorobom zawodowym zatrudnionych osób.

Definicja ryzyka zawodowego

Ministerstwo Pracy definiuje **ryzyko zawodowe**, jako prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zdarzeń (zagrożeń) związanych z wykonywaną pracą i powodujących straty, oraz ich skutki dla zdrowia lub życia pracowników w postaci chorób zawodowych i wypadków przy pracy. Z tego wynika, że **ryzyko zawodowe** to nic innego jak niebezpieczeństwa, na które narażony jest pracownik w czasie wykonywania swoich obowiązków.

Ocena ryzyka zawodowego

Według przepisów kodeksu pracy pracodawca jest zobowiązany do oceny i dokumentowania **ryzyka zawodowego** związanego z wykonywaniem przez pracowników swoich obowiązków, a także do stosowania niezbędnych środków profilaktycznych w celu zniwelowania zagrożeń. Przeprowadzając ocenę **ryzyka zawodowego** należy wziąć pod uwagę wszystkie czynniki środowiska występujące podczas wykonywania pracy na danym stanowisku. Bowiem głównym celem oceny ryzyka zawodowego jest poprawa warunków pracy oraz ochrona życia i zdrowia zatrudnionych osób.

Państwowa Inspekcja Pracy określiła 5 zasad przeprowadzania oceny ryzyka w zakładach pracy, tj. :

1. Zebranie informacji potrzebnych do przeprowadzenia oceny **ryzyka zawodowego**
2. Identyfikacja zagrożeń. Określenie dla każdego stanowiska pracy, jakie występują na nim zagrożenia
3. Oszacowanie ryzyka
4. Określenie działań eliminujących lub ograniczających **ryzyko zawodowe**
5. Dokumentowanie wyników oceny **ryzyka zawodowego**.

Ustawodawca nie określa, kto może badać i oceniać ryzyko. Obowiązek prowadzenia dokumentacji spada na pracodawcę. Zatem każda osoba prowadząca działalność gospodarczą

i zatrudniająca pracowników, która nie musi tworzyć służby BHP, może samodzielnie przeprowadzić ocenę **ryzyka zawodowego**.

Informacja o ryzyku zawodowym

Do zadań pracodawcy należy **informowanie osób zatrudnionych o ryzyku występującym na danym stanowisku** oraz o zasadach ochrony przed niebezpieczeństwami.

Z powyższego wyjaśnienia widać, że po wprowadzeniu zapisów Dyrektywy pracodawcom, których pracownicy mają kontakt z radonem, przybędzie szereg dodatkowych obowiązków. Jednym z najważniejszych będzie oszacowanie ryzyka związanego z występowaniem radonu.

Ryzyko zawsze było, od zarania dziejów, związane z działaniem człowieka i to zarówno w pojedynkę, jak i w większej grupie. Już około 3200 lat p.n.e. w dolinie Tygrysu i Eufratu grupa ludzi nazywana Asipu, służyła radą ludziom, którzy podejmowali ryzykowne, niepewne i trudne decyzje. Grecy i Rzymianie obserwowali przyczynowe związki pomiędzy warunkami środowiska i stanem zdrowia. W IV wieku p.n.e. Hipokrates dostrzegł ryzyko dla zdrowia człowieka płynące z uwarunkowań zewnętrznych. W I wieku p.n.e. Vitruvius stwierdził toksyczność ołowiu⁵⁷. W połowie naszego stulecia stwierdzono, że krótkożyciowe produkty rozpadu radonu, tworzące z pyłem zawieszonym w powietrzu aerozole promieniotwórcze deponujące się w płucach, odpowiedzialne są za powstawanie nowotworów płuc.^{58,59,60}

Działanie promieniowania jonizującego na układy biologiczne może powodować efekty stochastyczne i deterministyczne. Efektami stochastycznymi są zmiany w pojedynczych komórkach. Ich skutkiem mogą być nowotwory złośliwe lub zmiany dziedziczne (genetyczne) przejawiające się u potomstwa. Natomiast efekty deterministyczne występują dopiero po przekroczeniu pewnej dawki progowej. Są nimi nieodwracalne zmiany w tkankach i narządach, które mogą powodować niezdolność ich prawidłowego funkcjonowania przejściowo lub na stałe, w skrajnych przypadkach prowadząc do śmierci napromieniowanego osobnika.

Stochastyczne efekty działania promieniowania jonizującego można opisać za pomocą następujących pojęć:



1. Ryzyko względne (RR) zdefiniowane jako $RR=O/E$ gdzie O – liczba nowotworów obserwowanych w badanej populacji, a E oznacza liczbę nowotworów oczekiwanych w tej populacji, gdyby populacja ta nie była narażona
2. Ryzyko dodatkowe (ER) zdefiniowane jako $ER=O-E$
3. Nadmiar ryzyka względnego: $ERR= RR-1 = (O-E)/E$

Mikroryzyko – to ryzyko jednego zgonu na milion mieszkańców w wyniku wykonywania (przez każdą osobę z tego miliona) tej samej, określonej czynności. Takie mikroryzyko pojawi się, gdy ktokolwiek z nas uczestniczy w zwykłych czynnościach, jak wypalenie jednego papierosa.

Ryzyko zaindukowania nowotworu płuc w wyniku oddychania radonem i jego pochodnymi.

Najważniejsze badania epidemiologiczne ludzi narażonych na promieniowanie jonizujące w trakcie pracy zawodowej dotyczą narażenia górników na radon (^{222}Rn) i jego krótkożyciowe produkty rozpadu (RaA, RaB, RaC', tzn. ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Po). Już od XVI wieku obserwowano wysoką umieralność górników w kopalniach Schneebergu i Jachymowa (Rudawy) nowotworu płuc.

Źródłem dziewięćdziesięciu kilku procent dawki równoważnej dla narządu oddechowego człowieka jest promieniowanie alfa ^{218}Po , ^{214}Po . Dominująca część produktów rozpadu Rn absorbuje się na cząsteczkach pyłów występujących w powietrzu kopalni, które w czasie oddychania są zatrzymywane w ok. 30-40 % w oskrzelach, oskrzelikach i w pęcherzykach płuc. Nuklidy te w postaci wolnych jonów (tzw. frakcja niezwiązana z aerozolami) zostają zatrzymane praktycznie całkowicie w drzewie oskrzelowym. Największa dawka promieniowania alfa jest pochłaniana w nabłonku wyściełającym duże oskrzela (płatowe, segmentowe) i tam też najczęściej – acz nie wyłącznie – rozwijają się po wielu latach od początku ekspozycji złośliwe nowotwory układu oddechowego (raki płuc).

Umieralność z powodu nowotworów płuc u górników narażonych na duże stężenia radonu i jego pochodnych w kopalniach rud uranu i innych metali, a także innych minerałów, śledzono intensywnie w ciągu kilkudziesięciu lat w wielu krajach.

Powszechność występowania radonu powoduje, że nie tylko górnicy narażeni są na jego działanie, ale także mieszkańcy i pracownicy pracujący w innych miejscach pod ziemią jak np. tunele czy podziemne trasy turystyczne.

W publikacji ICRP 115⁵⁴ przedstawione zostały wyniki badań epidemiologicznych. Przedstawiono trzy wspólne analizy, które zostały przeprowadzone w oparciu o dane z Europy (Darby i wsp., 2005), z Ameryce Północnej (Krewski et al., 2005, 2006), i Chin (Lubin i wsp., 2004). Każda z poszczególnych analiz wykazała, że ryzyko raka płuc wzrasta przy skumulowanej ekspozycji w domu na radon. Okres ekspozycji dla Ameryki Północnej i Chin wynosił, co najmniej 30 lat przed diagnozą nowotworu płuc, a 35 lat przed diagnozą dla mieszkańców Europy. W każdym badaniu, stężenie radonu oszacowano na 5 lat przed wykryciem nowotworu. Założono, że minimalny czas indukcji nowotworu wynosi 5 lat na podstawie danych pochodzących z badań podziemnych górników (NRC, 1999).

I tak: szacunkowe zwiększone ryzyko względne zachorowania na raka płuc przy wieloletniej ekspozycji na radon o stężeniu 100 Bqm⁻³ wynosi, dla Europy (Darby et al., 2006) 1,08, dla Ameryki Północnej (Krewski et al., 2006) 1,10 a dla Chin (Lubin et al., 2004) 1,13.

Na podstawie wyników analizy danych europejskich stwierdzono, że ustawiczne palenie papierosów powoduje, że ryzyko występowania raka płuc jest około 25 razy wyższe niż w przypadku osób niepalących. (Darby i wsp., 2006).

Bardzo ciekawą analizę oddziaływania promieniowania na organizm ludzki przedstawił w swojej publikacji DM Parkin, i SC Darby pt. „Nowotwory w 2010 przypisane działaniu promieniowania jonizującego w Wielkiej Brytanii⁶¹„ Z przedstawionego oszacowania wynika, że w roku 2010 zdiagnozowano 5807 nowotworów, z czego 1170 to nowotwory spontaniczne (nie spowodowane promieniowaniem), 1861 powstało w wyniku diagnostyki radiologicznej, 1380 przez stosowanie radioterapii, 19 wywołała medycyna nuklearna, a 1376 spowodował radon.

Jak z powyższego widać, przy długookresowej ekspozycji na radon można spodziewać ujemnych efektów jego działania w postaci zaidukowanych nowotworów. Polska nie należy na szczęście do obszarów o szczególnie podwyższonym stężeniu radonu, tym niemniej jego występowanie i działanie na organizm ludzki może przyczynić się do wzrostu zgonów z powodu nowotworów płuc.

Przeprowadzone przeze mnie w ubiegłych latach pomiary w uzdrowiskach i SPA, kopalniach metali kolorowych i mieszkaniach pokazały, że stężenia roczne przekraczają nie tylko poziom 100 Bqm⁻³, ale w wielu przypadkach poziom odniesienia, czyli 300 Bqm⁻³.

W kopalniach metali kolorowych pomiary stężeń radonu prowadzone są przez Instytut Medycyny Pracy od wielu lat. Na podstawie pomiarów w roku 2010 oszacowano narażenie górników w czterech kopalniach metali kolorowych⁶². I tak w latach 1998 – 2009 średnia

dawka efektywna wyniosła $2,1 \pm 0,9$ mSv. W latach 2010 – 2015 roczne średnie stężenia radonu w kontrolowanych kopalniach wynosiły od 300 do 800 Bqm⁻³ ⁶³

W budynkach mieszkalnych na terenie Łodzi pomiary stężeń radonu wykonywane były przez Instytut Medycyny Pracy trzykrotnie:

1. W okresie 01.07.1998–31.12.2000 w ramach tematu „Analiza możliwości oceny ekspozycji na radon za pomocą pomiaru zawartości ołowiu ²¹⁰Pb w szybach”, nr projektu: 4P05D 069 16 (Komitet Badań Naukowych).
2. W roku 2005 w ramach obchodów Światowego Roku Fizyki 2005.
3. W okresie 01.03.2008–01.03.2009 w ramach tematu „Sezonowe zmiany stężenia radonu w budynkach mieszkalnych” realizowanego przez Uniwersytet Medyczny w Białymstoku, nr wniosku N N506 1127 33.

Przeprowadzone pomiary średnich okresowych stężeń radonu w mieszkaniach w Łodzi wykazały, że średnie roczne stężenie tego pierwiastka na przełomie lat 1998/1999 znajdowało się na poziomie 91 Bqm⁻³, a w okresie 2008/2009 było na poziomie 75 Bqm⁻³. Średnie stężenie za pół roku w roku 2005 wyniosło 52 Bqm⁻³. Jako ciekawostkę można podać, że w dwóch przypadkach średnie roczne stężenie radonu w mieszkaniu przekroczyło 100 Bqm⁻³. ⁶⁴

Pomiary stężeń radonu w Łodzi za pomocą Pico-Rad. przeprowadziła również Politechnika Łódzka w latach 1988-1999⁶⁵. Średnie stężenie w zmierzonych 486 mieszkaniach położonych na parterze i pierwszym piętrze wyniosło 23,4 Bqm⁻³. Maksymalne zmierzone stężenie wyniosło 170 Bqm⁻³.

Wspomniane powyżej badania wykonane w ramach realizowanego przez Uniwersytet Medyczny w Białymstoku grantu pozwoliły na oszacowanie zakresu zmienności stężeń radonu w budynkach położonych w całej Polsce. Pomiary wykazały, że stężenie radonu jest w budynkach mieszkalnych wyższe niż dotąd sadzono. Średnie stężenie radonu w Polsce wyniosło 170 Bqm⁻³, a najwyższe wartości średniego rocznego stężenia radonu odnotowano w budynkach położonych w Sudetach (850 Bqm⁻³)⁶⁶.

Na podstawie tych badań opracowano również współczynniki umożliwiające przeliczenie średnich miesięcznych stężeń radonu w mieszkaniach na średnio roczne stężenia, co powinno być wykorzystane przy tworzeniu mapy radonowej Polski.⁶⁷

Oczywiście istnieją również inne obszary prawie nierozpoznane pod względem występowania radonu np. przedszkola czy szkoły. Na przykład wykonane w 2011 roku pomiary stężenia radonu w przedszkolach w Kaliszu i w Ostrowie Wielkopolskim pokazały, że

średnie stężenia radonu są niższe niż 100 Bq m^{-3} , (odpowiednio 46,0 i 48,9 Bq m^{-3}), tym nie mniej maksymalne stężenia wyniosły 194 i 219 Bq m^{-3} .⁶⁸

Z przedstawionych powyżej danych wynika, że problemu radonu nie należy lekceważyć. W przypadku oceny rakotwórczego istotna jest znajomość współczynników umożliwiających określenie prawdopodobieństwa zaindukowania nowotworu w zależności od ekspozycji na radon i pochodne.

Również w tym przypadku różne gremia naukowe proponują inne podejścia do obliczenia ryzyka zaindukowania nowotworu, opierając się na tych samych lub różnych kohortach osób narażonych na oddziaływanie radonu.

W poniższej tabeli przedstawione są różne współczynniki ryzyka obliczone dla trzech modeli. Poniższa tabela nr 5 zamieszczona jest w publikacji 65 ICRP.⁶⁹

Tabela nr 5. . Nadmiar życiowego względnego ryzyka i życiowego prawdopodobieństwa śmiertelnego nowotworu płuc dla referencyjnego pracownika płci męskiej przypisanego chronicznej zawodowej ekspozycji na pochodne radon (^{222}Rn) w wieku od 18 do 64 (zakładając, że $\text{ryzyko} = 0,042$)

Rodzaj ryzyka	Roczna ekspozycja mJhm^{-3} (WLM)	Zastosowany model		
		PRR model ICRP 50 (1987)	TSE model BEIR IV (1988)	TSE model GSF (1992)
Nadmiar ryzyka względnego	3,5 (1,0)	0,35	0,29	0,31
	7,0 (2,0)	0,68	0,56	0,62
	14,0 (4,0)	1,33	1,12	1,19
Nadmiar całkowitego ryzyka	3,5 (1,0)	0,015	0,012	0,013
	7,0 (2,0)	0,029	0,024	0,026
	14,0 (4,0)	0,056	0,047	0,050

W poniższej tabeli nr 6 zamieszczone są współczynniki ryzyka podane w publikacji 115 ICRP.⁵⁴

Tabela nr 6. Zestawienie nadmiaru ryzyka względnego (ERR) od 100 WLM, opublikowane z łączonej analizy badań w kopalniach

Źródło	liczba kohort	liczba górników	osobo-lata	ERR na 100 WLM	OS	95%CI
ICRP (1993)	7	31486	635022	1.34		0.82-2.13
Lubin i in. (1994)	11	60570	908903	0.49		0.20-1.00
NRC (1999)	11	60705	892547	0.59	1.32	
INSCEAR (2009)	9	125627	3115975	0.59		0.35-1.00
Tomášek i in. (2008)	2	10100	248782	1.60		1.00-2.30

OS- odchylenie standardowe; CI poziom ufności

Jak widać z powyższego, nie jest proste określenie jednego współczynnika ryzyka, a problem jeszcze komplikuje synergiczny wpływ palenia papierosów na zachorowalność na nowotwory płuc.

Dla zobrazowania problemu, poniżej przedstawiona jest analiza skutków ekspozycji na radon dla pracowników pracujących w podziemnych trasach turystycznych. Do analizy wybrano model BEIR VI (**B**iological **E**ffects of **I**onizing **R**adiation **I**V).

Analizy przeprowadzono na podstawie pomiarów stężeń radonu wykonanych w podziemnych trasach turystycznych. Równoważne dawki do płuc, i względne ryzyko (RR), zachorowania na nowotwór płuc wśród pracowników w wybranych trasach turystycznych w Polsce były określone na podstawie zmierzonych stężeń radonu i informacji na temat czasu pracy w tych stężeniach.⁷⁰

Krótkie podsumowanie badań przeprowadzonych w podziemnych trasach turystycznych w Polsce wygląda następująco: w 98,5% badanych polskich podziemnych tras turystycznych średnie stężenie radonu przekracza 100 Bqm⁻³, w 67,7% przekracza poziom odniesienia 300 Bqm⁻³, a w 1,5% przewyższa 10 kBqm⁻³. Spośród 66 przebadanych tras, tylko w 31 zatrudnieni byli pracownicy.

Równoważne dawki na płuca pracowników szlaków turystycznych wyliczono stosując współczynniki obliczone przez Kendall et al., w odniesieniu do ludzkiego modelu dróg oddechowych. Współczynnik dawki równoważnej na płuca od radonu obliczono jako równy $8,95 \cdot 10^{-5}$ (mSv·m³)/(Bq·h), (współczynnik dawki na płuca =35,8 mSv/Bq·h, otrzymany z [Kendall] (tabela nr. 2), został przeliczony na 1 Bq/m³ i 1 h/rok)⁷¹. Względne ryzyko (RR) oznacza stosunek prawdopodobieństwa wystąpienia raka płuc wśród osób, które były narażone na wpływ sumy naturalnego i zawodowego narażenia na radon, z prawdopodobieństwem

zachorowania na raka płuc wśród ludzi, którzy nie byli narażeni zawodowo. Względne ryzyko zachorowania na raka płuc zostało obliczone za pomocą modelu ustanowionego przez Komitet BEIR VI (**Biological Effects of Ionizing Radiation IV**)⁷².

Ten model opiera się na sumarycznej ekspozycji na radon i jego pochodne, wyrażonej w WLM (w układzie SI 1WLM = 3,51 mJhm⁻³ ekspozycji na radon i jego pochodne). Model zakłada, że na wzrost ryzyka względnego zachorowania na nowotwór płuc od ekspozycji na radon mają zróżnicowany wpływ inne czynniki - maleje wraz z wydłużeniem czasu od ekspozycji i wzrasta wraz z osiągniętym wiekiem. Wybrano model Komitetu BEIR IV, ponieważ nie zakłada on zależności ryzyka od palenia papierosów, a nasze badania nie objęły analizy zależności ryzyka od palenia. Według tego modelu założono, że ekspozycja otrzymana w czasie ostatnich 5 lat przed datą analizy, nie zwiększa ryzyka zachorowania na nowotwór płuc. Model określa różne przedziały czasu ekspozycji przed śmiercią na nowotwór, i tak sumaryczna ekspozycja od radonu jest sumą ekspozycji w trzech oknach czasowych: 5-14, 15-24, i 25 lat i więcej, przed osiągnięciem obecnego wieku (t.j. w_{5-14} oznacza średnią ekspozycję otrzymaną w okresie pomiędzy 5 lat przed osiągnięciem obecnego wieku i 14 lat przed osiągnięciem obecnego wieku). Model przedstawia się następująco:

$$RR = 1 + \beta(w_{5-14} + 0.78w_{15-24} + 0.51w_{25+})\theta_{age}\lambda_z,$$

gdzie

- β jest współczynnikiem nachylenia zależności ekspozycja-ryzyko ($\beta=0.0768$); w_{5-14} , w_{15-24} , w_{25+} przedstawia sumaryczną ekspozycję na radon (wyrażoną w WLM) otrzymaną w przedziale czasowym odpowiednio 5-14 lat, 15-24 lat i 25+ lat lub więcej, przed osiągnięciem obecnego wieku. Wartości przed każdym 'w' w równaniu 1 są parametrami zaczerpniętymi z BEIR VI dla modelu ekspozycja-wiek-stężenie (Tabela 3-3). WLM zawiera sumaryczną ekspozycję od radonu w zarówno: miejscu pracy (czas pracy zawiera się w przedziale 40-2200 godz/rok, i zależy od polityki każdej trasy podziemnej), i w pracy (5000 godz. w stężeniu radonu szacowanym na 100 Bq/m³) i na zewnątrz (liczba godzin w roku pomniejszona o czas spędzony w domu, i w pracy; założono, że stężenie radonu na zewnątrz wynosi 10 Bq/m³);
- θ_{age} jest współczynnikiem zależnym od osiągniętego wieku (jego wartości wynoszą odpowiednio: $\theta_{age<55}=1$, $\theta_{age55-64}=0.57$, $\theta_{age65-74}=0.29$, $\theta_{age75+}=0.09$)
- i
- λ_y reprezentuje efekt stopnia narażenia ($\lambda_y=1$).

Wszystkie obliczenia ryzyka względnego zakładały, że wiek pracowników wynosi max 64 lata.

Do oszacowania skutecznych dawek otrzymanych przez ludzi pracujących w podziemnych trasach turystycznych zastosowano współczynnik konwersji dawki proponowany przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA) w raporcie nr 33⁷³.

Rozkład dawki dla pracowników podziemnych szlaków turystycznych jest następujący: W 13 trasach, efektywna dawka wynosiła ponad 1mSv/rok ($n = 161$ osób). W 3 trasach skuteczna dawka przekroczyła 6 mSv/rok ($n = 27$ osób).

W 5 trasach (34 pracowników), ekwiwalent dawki do płuc wynosił ponad 100 mSv/rok, a w jednym przypadku wyniósł aż 490 mSv / rok (3 osób).

Spośród wszystkich analizowanych tras turystycznych, w 22,6% przypadków współczynnik ryzyka względnego RR po 40 latach pracy (średnia wartość dla każdej trasy) osiągnął wartość ponad 2.

W jednym przypadku RR osiągnął nawet wartość 5,2 (stężenie radonu - 6790 Bq·m³, czas pracy był 800 h/rok).

Oznacza to, że na 22,6% stanowisk pracy, o których mowa powyżej (56 pracowników), ryzyko zachorowania raka płuc wśród pracowników jest około 2 razy wyższe niż dla przeciętnej osoby żyjącej w Polsce, a w jednym szlaku turystycznym (3 pracowników) jest około 5-krotnie wyższe.

Dane statystyczne wskazują⁷⁴, że w ciągu 40 lat, ok. 2,2% populacji polskiej zachoruje na nowotwór płuc. Można oszacować, że w ciągu 40 lat życia zawodowego, u około 31 z 1400 osób (1400 - szacowana przez nas liczba pracowników w 200 podziemnych trasach turystycznych) nastąpi rozwój nowotworu płuc. Analiza względnego ryzyka prowadzi do wniosku, że w tej grupie 31 osób 42,3% przypadków nowotworów płuca (13 osób) byłoby spowodowane narażeniem na radon.

Reasumując, względne ryzyko zachorowania na nowotwór płuc jest wyższe w przypadku osób pracujących w podziemnych trasach turystycznych, niż dla ogółu populacji. Pracownicy podziemnych tras turystycznych powinni być monitorowani pod kątem narażenia na radon.

Pomiary przeprowadzone w uzdrowiskach i SPA wykazały, iż jedynie w siedmiu przypadkach mamy do czynienia ze stężeniami przekraczającymi 300 Bqm⁻³. Występują jednak stężenia przekraczające 1000 Bqm⁻³. Przeprowadzając podobną analizę narażenia

można oszacować, że w ciągu 40 lat życia zawodowego, w tej pracowników uzdrowisk i SPA jeden przypadek nowotworów płuca byłoby spowodowany narażeniem na radon.

9. Podsumowanie

Przedstawione powyżej rozważania wykazały, że powszechne występowanie radonu w podziemnych trasach turystycznych stanowi problem organizacyjno prawny i zdrowotny. Obecnie prowadzone są działania mające na celu dostosowanie ustawodawstwa polskiego do wymogów międzynarodowych. Szczególnie istotne będzie opracowanie przepisów wykonawczych ze szczególnym uwzględnieniem problemu podziemnych tras turystycznych. Jak wiemy, podziemne trasy turystyczne są sztuczne i naturalne. Projektowane przepisy muszą uwzględniać tę specyfikę tras. W ustawie Prawo atomowe zapisane zostanie (najprawdopodobniej), że poziom odniesienia dla stężeń radonu występującego w podziemnych miejscach pracy wyniesie 300 Bqm^{-3} .

Opisane powyżej pomiary pokazują, że w dużej liczbie tras (oszacowano na 70%) będzie występować w ciągu całego roku stężenie przekraczając, czasami znacznie, poziom odniesienia, czyli 300 Bqm^{-3} . Obniżenie poziomu stężenia radonu w pomieszczeniach sztucznych tras turystycznych można osiągnąć poprzez otamowanie miejsc, z których wypływa radon lub zwiększenie wentylacji tras.

Jaki problem może stanowić niekontrolowane otwieranie podziemnych tras turystycznych niech pokaże następujący przykład.

Kopalnia Podgórze – trasa turystyczna w byłej kopalni uranu

Kopalnia Podgórze była jedną z pierwszych kopalń rud uranu zgrupowanych w tzw. Kowarskich Kopalniach. Kopalnia ta pracowała w latach 1950-58. Rudę uranową eksploatowano w strefie uskoku głównego i jego odgałęzieniach, przede wszystkim w miejscach przecięcia z główną warstwą i warstewkami łupków. Złoże występowało do głębokości 529 m. Kopalnia przewietrzana była za pomocą świeżego powietrza i w razie konieczności za pomocą odpowiedniej wentylacyjnej⁷⁵.

O zagrożeniach występujących w kopalniach w tamtym okresie niewiele mówiono, ale wykonywano np. pomiary stężeń radonu. Pierwsze wykonane pomiary wykazały, że stężenia radonu są na poziomie przekraczających 3 MBqm^{-3} . Po zastosowaniu systemów wentylacyjnych stężenie w wyrobiskach kopalnianych utrzymywało się na poziomie 370

kBqm⁻³. Kopalnia Podgórze została zamknięta w roku 1958. W roku 1974 w sztolni nr 19 kopalni Podgórze uruchomiono komorę inhalacyjną. Pod koniec lat 80 zlikwidowano działalność leczniczą na terenie kopalni Podgórze. Wejście do sztolni 19 i 19a zabezpieczono przed dostępem osób postronnych.

W roku 1995 w ramach realizacji tematu badawczego 0837/S4/93/04 wykonałem w wylocie sztolni 19 pomiar stężenia radonu⁷⁶. Wynik o wartości 50 kBqm⁻³, potwierdził występowanie wysokich stężeń radonu w tej kopalni.

W roku 2009 podjęto próbę uruchomienia podziemnej trasy turystycznej w sztolni nr 19. Dopiero jednak w marcu 2011 roku zlecono Instytutowi Medycyny Pracy przeprowadzenie pomiarów stężeń radonu w wyrobiskach kopalni. Średnie zmierzone stężenie w trasie wyniosło 30,7 kBqm⁻³, a maksymalne stężenie zmierzone w tzw. sali biesiadnej to 60,3 kBqm⁻³. Niestety zarządzający trasą zignorowali fakt występowania radonu i nie zainstalowali odpowiednich wentylatorów (rysunek 21). Dopiero po zapoznaniu się z wynikami pomiarów zainstalowali wentylator pchający dostarczający świeże powietrze do sztolni.

Pomiary powtórzono w listopadzie tego samego roku już po zamontowaniu wentylatorów. Wyniki były dość zadowalające. Średnie stężenie w sztolni wyniosło 8,3 kBqm⁻³, a maksymalne 10,4 kBqm⁻³. W kwietniu roku następnego wyniki pomiarów były również zadowalające. Średnie stężenie w sztolni wyniosło 3,0 kBqm⁻³, a maksymalne 8,9 kBqm⁻³. W roku 2011 wykonano we wrześniu jeszcze jeden cykl pomiarowy. Średnie stężenie w sztolni wyniosło 2,9 kBqm⁻³, a maksymalne 4,4 kBqm⁻³. Niestety osiągnięcie takich poziomów stężeń wymagało kilkudniowego załączania wentylacji, co w przypadku tej trasy okazało się bardzo kosztowne. Z tych i innych powodów ekonomiczno-organizacyjnych trasę wkrótce zamknięto.

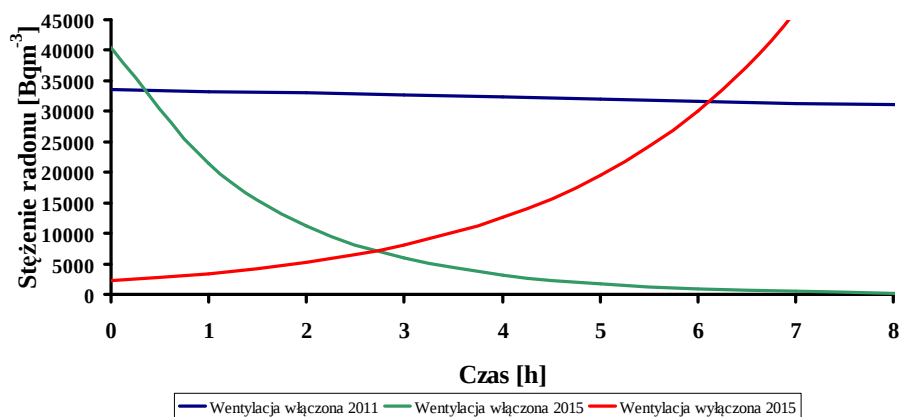
Niestety, na początku roku 2015 inna grupa ludzi postanowiła reaktywować podziemną trasę turystyczną. Popełniono przy tym kolejny błąd lekceważąc zagrożenie związane z radonem, pomimo, że znane im były poprzednie wyniki. Zupełnie zlekceważono brak wentylacji w sztolni.

Dopiero w lipcu tego roku przeprowadzono pierwsze pomiary stężenia radonu. Wyniki pokazały, że w sztolni nadal panuje wysokie stężenie radonu, co oczywiście było do przewidzenia. W pomieszczeniu zwanym inhalatorium stężenie radonu zmierzone przeze mnie sięgnęło prawie 300 kBqm⁻³. Podobnie jak podczas pierwszego uruchomienia trasy wprowadzono wentylację mechaniczną z tym, że uruchomiono dwa wentylatory. Jeden na wejściu do sztolni drugi na końcu trasy, jako wentylator wspomagający. Jego rolą było wypchnięcie powietrza w sztolnie odpowietrzające.



Przeprowadzone po zainstalowaniu wentylatorów pomiary wykazały skuteczność podjętych działań. Średnie stężenie w trasie spadło prawie stukrotnie i wyniosło $6,5 \text{ kBq m}^{-3}$. Ze względu na wysokie stężenia radonu trasa wymaga intensywnej wentylacji przeprowadzono w październiku 2015 roku pomiaru mające na celu zobrazowanie zmian stężeń radonu w trasie w zależności od czasu włączenia lub wyłączenia wentylatorów. Na poniższym rysunku 21 przedstawiona jest analiza tych badań. Dla zobrazowania problemu na tym samym wykresie pokazany jest spadek średniego stężenia radonu w trasie zmierzonego w okresie pierwszego uruchomienia trasy. Wtedy zainstalowany był jedynie jeden wentylator o dwukrotnie mniejszej mocy.

Niestety podczas uruchamiania trasy zarówno za pierwszym jak i za drugim razem zlekceważono zupełnie problem radonu. Przez wiele tygodni w okresie przygotowawczym do uruchomienia trasy pracowano w bardzo wysokich stężeniach radonu, co może zaowocować negatywnymi skutkami w przyszłości (nowotwór płuc). Uruchomiono trasę również bez koniecznych w tym przypadku pomiarów. Nie przygotowano trasy pod względem bezpieczeństwa radiacyjnego – otamowanie nie przeznaczonych do zwiedzania tuneli i zainstalowanie odpowiedniej wentylacji. Podejmowane działania po wykonaniu pomiarów są prowizoryczne i nie zapewniały wystarczającego poziomu bezpieczeństwa. Stan na 2016 rok.



Rys 21. Zmiany średnich stężeń radonu w podziemnej trasie „Podgórze” w zależności od wentylacji włączona (zielona linia) lub wyłączona (czerwona linia) w sztolni. Linia czarna obrazuje spadek stężenia radonu obserwowanego w 2011 przy zainstalowaniu zwykłego wentylatora.

10. Wnioski

Rok 2019 nie przyniósł do tej pory, wbrew oczekiwaniom, uchwalenia ustawy Prawo atomowe. Oznacza prawdopodobnie dwu letnie opóźnienie w uchwaleniu ustawy w stosunku do zapisu w Dyrektywie. Jak ważne dla społeczeństwa będzie uchwalenie ustawy pokazały zawarte w teksie informacje⁷⁷. Można je podsumować następująco:

Rozszerzenie ochrony przed promieniowaniem o naturalne pierwiastki promieniotwórcze w tym radon niesie za sobą konsekwencje czasami trudne do przewidzenia.

To nowe, rewolucyjne podejście musi zostać uwzględnione w całym życiu człowieka, a więc w pracy i w domu oraz wszędzie gdzie przebywa. W przedstawionej rozprawie zaprezentowałem problem radonu w dwóch miejscach pracy: podziemnych trasach turystycznych i uzdrowiskach. Nie należy również zapominać o kopaniach i tunelach i innych miejscach pracy. Osobnym zagadnieniem stanie się narażenia ludności od radonu w domach, czy innych miejscach pobytu związanych np. z nauką.

W dalszych pracach związanych z występowaniem radonu należy uwzględnić następujące zagadnienia:

1. przepisy prawne uwzględniające specyfikę zagadnienia
2. prowadzenie dalszych badań epidemiologicznych nad oddziaływaniem radonu na organizm człowieka
3. ustalenie zasad ochrony radiologicznej również z uwzględnieniem specyfiki radonowej, szczególnie weryfikacja współczynników pozwalających na wyliczenie dawki skutecznej od radonu
4. Radon stosowany jest również jako środek leczniczy co powinno również zostać uwzględnione w dalszym postępowaniu wymuszonym przez uchwaloną Dyrektywę

Badania prowadzone od wielu lat przeze mnie oraz przedstawiona analiza wykazały, że pracownicy podziemnych tras turystycznych i w niektórych uzdrowiskach powinni być traktowani jako zawodowo narażeni na promieniowanie jonizujące. Powinny być do nich stosowane wszystkie przepisy regulujące pracę z promieniowaniem jonizującym.

Najbliższe planowane działania

Kontynuowanie badań nad narażeniem górników na radon jego pochodne. Opracowanie w ramach działań IMP i Centrum Radonowego przepisów wykonawczych, instrukcji i zaleceń dla podziemnych tras turystycznych związanych z występującym tam radonem. Badania nad obszarami zagrożenia radonowego.



11. Literatura

- ¹RAPORT ROCZNY Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2017 roku WARSZAWA 2017
- ²Bale W.F., Shapiro J.V.: Radiation dosage to lungs from radon and its daughter products. Proceedings of the International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy. 8–20 sierpnia 1955, Geneva, Szwajcaria. United Nations, New York 1956, ss. 233–236
- ³DYREKTYWA 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. 17.1.2014 Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 13/1 [PL]
- ⁴Eichstaedt I. Księga pierwiastków, Wiedza Powszechna, Warszawa, 1970.
- ⁵Szczeniowski Sz. Fizyka doświadczalna T VI. Fizyka jądra i cząstek elementarnych, PWN, Warszawa, 1974.
- ⁶Olszewski J., Casus radon, Rozdział w monografii "Ochrona przed promieniowaniem jonizującym i niejonizującym. Nowe uregulowania prawne, źródła, problemy pomiarowe. Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, 2015
- ⁷Pachocki K., Gorzkowski B., Wilejczyk E., Smoler J.: Zawartość radonu ²²²Rn w wodzie do picia w Świeradowie Zdroju i Czerniawie Zdroju. Roczn. PZH. 2000; 51(1): 43-52
- ⁸Przylibski T.A., Radon w środowisku wód podziemnych i górnej części litosfery. Wiadomości Chemiczne, (2002); 56(11-12), 1003-1033
- ⁹Przylibski T.A. Radon. Składnik swoisty wód leczniczych Sudetów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2005
- ¹⁰Kochański J.W., Balneologia i hydroterapia. Akademia Wychowania Fizycznego we Wrocławiu, 2002
- ¹¹Dz. U. 2011 Nr 163 poz. 981 USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze
- ¹²Slik E.C., Barnes R.S. Examination of fission fragment tracks with on electron microscope. Philosophical Magazine. Vol. 4, 970, 1959.
- ¹³Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M.; Solid-state track detectors. Applications to nuclear science and geophysics. Annual Review of Nuclear Science Vol. 15, 1, 1965.
- ¹⁴Fleischer L.R., Price P.B.; Glassdating by fission fragment traks. Journal of Geophysical Research Vol. 69, 331, 1964.
- ¹⁵Tommasino L., Armelini C.; A new etching technique for damage track detectors. Radiation Effects Vol. 20, 253, 1973.
- ¹⁶Łasoń L., Przytuła M., Ratajska M.; Wykorzystanie uszkodzeń radiacyjnych celuloidów do rejestracji cząstek alfa. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Łódzkiego, Nauki Matematyczno-Przyrodnicze, Seria II, zeszyt 45, s 77-82, 1971.
- ¹⁷Chruścielewski W., Olszewski J., Wojda A., Domański T.; Some essential features of CN-85 Kodak-Pathe track etch foil used for the detection of radon and its daughters. Nucl. Tracks, Vol. 9, N0 1, pp. 71-77, 1984.
- ¹⁸George 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.
- ¹⁹Gilvin P.J., Bartlett D.T.; Performance of a PADC radon dosemeter. Nucl Tracks Radiat Meas, 15(1-4), 571-576, 1988.
- ²⁰Kluszczyński i inni.; Wdrożenie nowego typu dozymetru z detektorem CR-39 oraz laboratoryjne porównanie różnych technik pomiarowych służących do oceny narażenia powodowanego przez ²²²Rn i jego produkty rozpadu. Sprawozdanie z tematu IMP 17.2 IMP, Łódź, 1996.
- ²¹Szot Z. Rad i radon w środowisku oraz skutki ich wchłonięcia do organizmu człowieka. PTJ Vol.36, z.1-2, s. 7-16, 1993.
- ²²Nauka o chorobach wewnętrznych pod redakcją prof. dr hab. med. T. Orłowskiego. Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich. Warszawa 1990.
- ²³Titus Lucretius Carus, O naturze wszechrzeczy. PWN 1957.
- ²⁴Natural Sources of Ionising Radiation in Europe, Radiation Atlas, Commission of The European Communities, 1992
- ²⁵Agricola G. "De Re Matallia" translation buy M.C. Heover and L.H. Hoover published in Mining Magazine, London 1912.
- ²⁶Haerting F.H., Hesse W.: [Lung cancer, the Bergkrainkheit in the Schneeberger ditches]. V Gericht Med Off Gesund Wes, 1879,30, 296. Po niemiecku
- ²⁷Thomas J.W., Le Clare P.C.; A study of the two-filter method for radon-222. Health Physics Pergamon Pres., Vol. 18, 1970.
- ²⁸Kluszczyński D., Kamiński Z., Opracowanie algorytmu korelacji gęstości śladów detektorów promieniowania alfa w automatycznym systemie analizy obrazu. Raport końcowy tematu IMP 16.5. Łódź, 2000

- ²⁹ Mamont-Cieśla K., Stawarz O., Karpińska M., Kapala J., Kozak K., Grządziel D., Chałupnik S., Chmielewska I., Olszewski J., Przylibski T.A., Żebrowski A. Intercomparison of radon CR-39 detector systems conducted in CLOR's calibration chamber. *Nukleonika* 2010 Vol. 55 nr 4 s. 589-593
- ³⁰ Chałupnik S., Kozak K., i inni. Raport z pomiarów porównawczych stężenia radonu Rn-222 i produktów jego rozpadu w powietrzu. Główny Instytut Górnictwa, Katowice, maj 2017
- ³¹ Podgórska Z., Wołoszczuk K. Raport z pomiarów porównawczych stężenia radonu w powietrzu metodą detektorów pasywnych. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa, sierpień 2018
- ³² K. Jilek, Results of the 2013 National Radiation Protection Institute Intercomparison of Radon/Thor5on gas and Radon Short-lived Decay Product Measurements Instruments. SURO vvi. REG 01 – 2013 January 2014
- ³³ www.sejm.gov.pl
- ³⁴ XVIII Forum Podziemnych Tras Turystycznych. Lublin 2018 Informacja własna
- ³⁵ Olszewski J., Chruścielewski W., Jankowski J., Radon on underground tourist router in Poland. *International Congress Series* 1276 (2005) 360 – 361,
- ³⁶ Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie w 45-lecie odkrycia. Pod redakcją Wojciecha Ciężkowskiego, Wrocław-Kletno 2012
- ³⁷ Ciężkowski M., 1978 – Wstępne pomiary stężenia niektórych gazów i radioaktywności w Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. *Acta Universitatis Wratislaviensis*. No. 311, Studia Geograficzne Xxiv, ss. 91-95.
- ³⁸ Olszewski J., Chruścielewski W., Jankowski J. / Radon exposure in selected underground touring routes in Poland. W: Second European IRPA Congress on Radiation Protection. Radiation protection: From Knowledge to Action. 15-19 May 2006 Paris France. Proceedings of full papers. CD-ROM. Paris: International Radiation Protection Association 2006 9 s. bibliogr. 9 poz.
- ³⁹ Przylibski T.A., 2012 – Badania promieniowania jonizującego w Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. [w:] Ciężkowski W., (ed.) – Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie w 45-lecie odkrycia. Wydawnictwo „Maria”, Wrocław-Kletno, pp. 161-176.
- ⁴⁰ Radon on underground tourist routes in Poland J. Olszewski*, W. Chruścielewski, J. Jankowski 0531-5131/D2004 Elsevier B.V. All rights reserved.doi:10.1016/j.ics.2004.10.015
- ⁴¹ Gawor F. Wykorzystanie wyrobisk pokopalnianych dla celów dydaktycznych, badawczych, leczniczych i turystycznych. Historia górnictwa w Karkonoszach. Symposium „Historia Górnictwa w Karkonoszach” Kowary – Jelenia Struga, 21,22.09.2009.
- ⁴² Muras K., Zagrożenie radiacyjne pracowników kopalń uranowych i środowiska naturalnego na przykładzie kopalni Podgórze w Kowarach, Historia górnictwa w Karkonoszach. Symposium „Historia Górnictwa w Karkonoszach” Kowary – Jelenia Struga, 21,22.09.2009.
- ⁴³ Informacja własna
- ⁴⁴ Chruścielewski W. Olszewski J. Raport. Ocena wpływu podziemnej trasy turystycznej na środowisko. IMP 1999
- ⁴⁵ Jerzy Olszewski; The underground tourist route Kowary Drifts – An example to follow. *Journal of Environment and Health Science*; 2018; DOI 10.15436/2378-6841.18.1684 1-5;
- ⁴⁶ Olszewski J., Chruścielewski W., Kacprzyk J., Kluszczyński D., Kamiński Z., Radon on selected underground tourists router in Poland. The Natural Radiation Environment VII. Seventh International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-VII) Amsterdam 2005, Elsevier
- ⁴⁷ Sieradzka-Kasprzak J., Roszkiewicz J.: Przewodnik po Polsce. Podziemne trasy turystyczne. Daunpol, Warszawa 2011
- ⁴⁸ Olszewski J., Zmysłony M., Wrzesień M., Walczak K., Występowanie radonu w polskich podziemnych trasach turystycznych. *Medycyna Pracy*, 66 (4) str 557-563, 2015
- ⁴⁹ Show H. Fong and Joseph L. Alvarez. When is a lower limit of detection low enough. *Health Physics*, 1997, V. 72 nr. 2 pp. 282 – 285
- ⁵⁰ Tomisław Domański, Jacek Doniec, Wojciech Chruścielewski., Radiation hazard in Polish spas – ten years' experience and studies. *Polish J. of Occupational Medicine* Vol. 1, No. 4, 1988
- ⁵¹ Jerzy Olszewski, Małgorzata Chodak, Jerzy Jankowski, Rozpoznanie aktualnego stanu narażenia na radon pracowników uzdrowisk w Polsce *Medycyna Pracy* 2008;59(1):35 – 38
- ⁵² Katarzyna Walczak, Jerzy Olszewski, Marek Zmysłony. International estimate of radon exposure in geothermal spas in Poland *Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 2016;29(1):161 – 166 <http://dx.doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00404>
- ⁵³ Międzynarodowe podstawowe normy ochrony przed promieniowaniem jonizującym i bezpieczeństwa źródeł promieniowania. IAEA Austria, Wydane PAA, 1997.
- ⁵⁴ ICRP Publication 115 Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon 2010

- ⁵⁵ ICRP Publication 126 Radiological Protection against Radon Exposure Recommended citation ICRP, 2014. Ann. ICRP 43(3).
- ⁵⁶ ICRP, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
- ⁵⁷ Ewa Kubińska Kaleta, Zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwach przemysłowych na przykładzie huty stali. Rozprawa doktorska. Akademia Górniczo Hutnicza, Kraków 2008.
- ⁵⁸ Shapiro J.V.; An Evaluation of the Pulmonary Radiation Dosage from Radon and its Daughter Products. Univ Rochester, UR-298, 1954
- ⁵⁹ Bale W.F., Shapiro J.V.: Radiation Dosage to Lungs from Radon and its Daughter Products. Proc 1 Int Conf on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1955, 13, 233-236, United Nations, New York, 1956
- ⁶⁰ Chamberlain A.C., Dyson E.D.: The dose of the tracheas and bronchi from the decay products of radon and thoron. Br. J. Radiol., 29, 317-325, 1956.
- ⁶¹ DM Parkin and SC Darby. Cancers in 2010 attributable to ionising radiation exposure in the UK. British Journal of Cancer (2011) 105, S57 – S65; doi:10.1038/bjc.
- ⁶² Jerzy Olszewski, Janusz Kacprzyk, Zbigniew Kamiński; Ocena narażenia radiacyjnego górników w wybranych kopalniach metali nieżelaznych na radon i produkty jego rozpadu. Medycyna Pracy 2010;61(6):635–639
- ⁶³ Olszewski J. Raporty dla kopalń kończące dany rok pomiarowy
- ⁶⁴ Jerzy Olszewski, Janusz Skubalski, Stężenie radonu w wybranych budynkach mieszkalnych na terenie miasta Łodzi. Medycyna Pracy 2011;62(1):31–36
- ⁶⁵ H. Bem, M. Ostrowska, E.M. Bem. Application of pulse decay discrimination liquid scintillation counting for indoor radon measurement. Czech. J. Phys., 49/51, 97-102 (!999).
- ⁶⁶ Tadeusz A. Przylibski, Adam Żebrowski, Maria Karpińska, Jacek Kapała, Krzysztof Kozak, Jadwiga Mazur, Dominik Grządziel, Kalina Mamont-Cieśla, Olga Stawarz, Beata Kozłowska, Barbara Kłos, Jerzy Dorda, Małgorzata Wysocka, Jerzy Olszewski, Marek Dohojda: Mean annual ²²²Rn concentration in homes located in different geological regions of Poland - first approach to whole country area. Journal of Environmental Radioactivity 102 (2011) 735 - 741
- ⁶⁷ Kozak K., Mazur J., Kozłowska B., Karpińska M., Przylibski T.A., Mamont-Cieśla K., Grządziel D., Stawarz O., Wysocka M., Dorda J., Żebrowski A., Olszewski J., Hovhannisyan H., Dohojda M., Kapała J., Chmielewska I., Kłos B., Jankowski J., Mnich S., Kołodziej R. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. Appl. Radiat. Isot. 2011 Vol. 69 nr 10 s. 1459-1465
- ⁶⁸ Henryk Bem • Ewa Maria Bem • Joanna Krawczyk • Marcin Płotek • Sławomira Janiak • Daria Mazurek Radon concentrations in kindergartens and schools in two cities: Kalisz and Ostrów Wielkopolski in Poland. J Radioanal Nucl Chem (2013) 295:2229–2232 DOI 10.1007/s10967-012-2272-2
- ⁶⁹ ICRP Publication 65 Protection Against Radon-222 at Home and at Work, 1993, Ann. ICRP 23 (2).
- ⁷⁰ Katarzyna Walczak, Jerzy Olszewski, Piotr Politański, Marek Zmyślony. Occupational exposure to radon in underground tourist routes in Poland: doses to lung and the risk of developing lung cancer. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health 2017;20(5):1–8
- ⁷¹ Kendall G M, Smith T J. Doses to organs and tissues from radon and its decay products. J.Radiat.Prot. 2002;22:389-406.
- ⁷² Hunter N, Muirhead C R, Bochicchio F, Haylock R G E. Calculation of the lifetime lung cancer risk associated with radon exposure, based on various models and exposure scenarios. J.Radiol.Prot. 2015;35:539-555, doi:10.1088/0952-4746/35/3/539
- ⁷³ Radiation protection against radon in workplaces other than mines. Safety reports series No. 33. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2003:27–8.
- ⁷⁴ [The number of cases by provinces and age groups in 2013. Reports on the basis of the Oncology Centre: Department of Epidemiology and Cancer Prevention Institute of Oncology Warsaw], [cited 2016 march 3]. Available from: <http://epid.coi.waw.pl/krn/> polish
- ⁷⁵ Muras K., Zagrożenie radiacyjne pracowników kopalń uranowych i środowiska naturalnego na przykładzie kopalni Podgórze w Kowarach, Historia górnictwa w Karkonoszach. Sympozjum „Historia Górnictwa w Karkonoszach” Kowary – Jelenia Struga, 21,22.09.2009.
- ⁷⁶ W. Chruścielewski, J. Olszewski, Z Kamiński. Badania zagrożenia radiacyjnego środowiska naturalnego w rejonach byłych kopalń rud uranu. Raport z badań. Projekt badawczy 0837/S4/93/04. IMP Łódź, 1996.
- ⁷⁷ **Olszewski J.**, Radon w świetle prawa atomowego, Rozdział w monografii “Ochrona przed promieniowaniem jonizującym i niejonizującym. Nowe uregulowania prawne, źródła, problemy pomiarowe. Warszawa, praca zbiorowa, PTBR, pod redakcją M. Zmyślony, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2018

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Przed doktoratem

Pracę zawodową w Instytucie Medycyny Pracy rozpocząłem realizując badania nad elektrochemicznym wytrawianiem detektorów śladowych, co zaowocowało uzyskaniem stopnia magistra. Następnie moje działania skupiały się przede wszystkim na zagrożeniach od radonu w podziemnych kopaniach węgla kamiennego i brunatnego, metali kolorowych i surowców chemicznych. Przeprowadziłem badania umożliwiające sklasyfikowanie kopalń węgla kamiennego pod względem zagrożenia radiacyjnego od radonu.

Byłem współwykonawcą dwóch grantów. Pierwszy grant ocenił stopień zagrożenia środowiska i ludzi wynikający z pozostałości po kopalniach uranu w Polsce. Realizacja drugiego grantu zbadała możliwości oceny ekspozycji na radon za pomocą pomiaru zawartości ołowiu Pb-210 w szybach.

Uczestniczyłem w dwóch międzynarodowych interkalibracjach metod pomiarowych stężeń radon (Francja, USA).

Opracowałem, zbudowałem i przetestowałem indywidualny dozymetr do pomiaru ekspozycji na pochodne radonu.

Byłem wykładowcą w Szkole Zdrowia Publicznego oraz na Podyplomowym studium Higieny Pracy i Ochrony Środowiska.

Byłem również wykładowcą na szeregu kursach z ochrony radiologicznej w środowisku pracy.

Odbyłem również staż szkoleniowy w Leningradzkim Naukowo Badawczym Instytucie Higieny Radiacyjnej.

Byłem autorem lub współautorem 27 publikacji w tym w 6. w czasopismach z bazy Journal Citation Reports

Uczestniczyłem w 17 zjazdach lub konferencjach w tym 3 zagranicznych. Wygłosiłem łącznie 12 referatów w tym jeden w języku angielskim i zaprezentowałem 14 posterów.

W okresie od 1981 do 2001 byłem kierownikiem lub wykonawcą 12 tematów badawczych realizowanych w Instytucie Medycyny Pracy.

Od 1987 roku pełnię funkcje Inspektora Ochrony Radiologicznej w Instytucie Medycyny Pracy w Łodzi, a od roku 1997 do 2016 pełniłem tę rolę w pracowni izotopowej kl. II znajdującej się w Zakładzie Medycyny Nuklearnej w Łodzi.

Kontynuowałem badania nad narażeniem górników w kopalniach metali kolorowych. Równocześnie skierowałem swoje zainteresowania w kierunku narażenia na promieniowanie jonizujące pochodzące od źródeł promieniotwórczych i aparatów rentgenowskich. Brałem udział we wprowadzeniu do rutynowego zastosowania detektorów termoluminescencyjnych do kontroli dawek na ręce. Za pracę nad tym zagadnieniem otrzymałem dwa wyróżnienia: Głównego Inspektora Pracy oraz Wyróżnienie Ministra Pracy i Polityki.

Badania nad narażenie rąk w pracowniach medycyny nuklearnej zaowocowały wpisaniem do przepisów prawnych zalecenia dotyczącego rak pracowników. W rozporządzeniu (D.U z 2006 r. nr 4. 180, poz. 1325) zalecono stosowanie dozymetrii palcowej przy pracy dziennym zużyciu izotopu technetu większym niż 1 GBq aktywności.

Otrzymałem nagrodę zespołową II stopnia w zakresie higieny radiacyjnej za publikację „Hand exposure to ionising radiation of nuclear medicine workers” Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych im. Marii Skłodowskiej-Curie – 2010.

Współpracowałem przy realizacji grantu „Sezonowe zmiany stężenia radonu w budynkach mieszkalnych” realizowanego przez Uniwersytet Medyczny w Białymstoku.

Prowadziłem pomiary stężeń radonu w budynkach mieszkalnych w Łodzi i okolicy oraz w Kowarach.

Byłem wykładowcą na szeregu kursach z ochrony radiologicznej w środowisku pracy.

Odbyłem cztery szkolenia: 2002 Niemcy, 2005 Litwa, 2013 Niemcy i 2017 Włochy.

Zrealizowałem 16 tematów badawczych z czego 8 związanych z radonem.

Jestem autorem lub współautorem 37 publikacji w tym w 26 w czasopismach z bazy Journal Citation Reports

Uczestniczyłem w 45 zjazdach lub konferencjach w tym 8 zagranicznych. Wygłosiłem łącznie 35 referatów i zaprezentowałem 14 posterów.

W okresie od 2002 do chwili obecnej byłem (jestem) kierownikiem lub wykonawcą 17 tematów badawczych realizowanych w Instytucie Medycyny Pracy.

Uczestniczyłem jako ekspert w komisji PAA mającej na celu przygotowanie implementacji Dyrektywy UE do prawa atomowego.

