

Politechnika Warszawska

Wydział Inżynierii Środowiska

Wykład: Metody Fizyki Jądrowej w Środowisku, Przemysle i Medycynie; prowadzący: prof. nzw. dr hab. Jan Pluta

Praca zaliczeniowa

*Zawartość radonu w powietrzu,
jego pochodzenie,
pomiar, obniżanie stężenia*

Wykonała:

Ewa Witkowska
doktorantka IŚ

ewa_witkowska@o2.pl

Warszawa, 19 grudnia 2003

1	<i>Rys historyczny</i>	2
2	<i>Dane ogólne na temat radonu</i>	3
3	<i>Źródła i występowanie - gdzie jest go najwięcej, mapy</i>	5
4	<i>Dlaczego radon jest problemem - jakie stanowi zagrożenie dla człowieka i dlaczego?</i>	11
5	<i>Sposoby i urządzenia pomiarowe</i>	18
6	<i>Radon w powietrzu wewnętrznym</i>	25
6.1	<i>źródła</i>	25
6.2	<i>od czego zależy stężenie radonu w pomieszczeniach</i>	29
6.3	<i>radon w powietrzu - jak wygląda sytuacja w różnych krajach</i>	32
6.3.1	<i>Polska</i>	32
6.3.2	<i>USA</i>	36
6.3.3	<i>Finlandia</i>	37
6.3.4	<i>Szwecja</i>	38
6.3.5	<i>Wielka Brytania</i>	39
6.3.6	<i>Chiny</i>	40
6.4	<i>sposoby zapobiegania przedostawaniu się radonu do budynków</i>	41
6.5	<i>kalkulator indywidualnej dawki radonu</i>	47
7	<i>Uregulowania prawne w Polsce i za granicą</i>	47
8	<i>Ciekawostki</i>	50
9	<i>Ciekawe linki</i>	51

1 Rys historyczny

- 1597 – Agricola zauważył u górników z Erz Mountain (pomiędzy Saksonią i Bohemią) częste występowanie jakiejś poważnej choroby płuc;
- 1879 – Hartung i Hesse (niemieccy fizycy) wskazali, że śmierć większości górników z kopalni w Schneeberg była spowodowana rakiem płuc;
U górników pracujących w Schneeberg przez więcej niż 10 lat obserwowano objawy choroby górników z Erz Mountain, nazwaną „Bergkrankheit” (chorobą górską).
- 1896 – Becquerel odkrył radioaktywności uranu;
- 1898 – małżeństwo Curie oraz Schmidt odkryli radioaktywność toru oraz nowe pierwiastki – rad i polon;
- 1898 – Rutherford wykazał, że promieniowanie uranu nie jest odbijane, załamywane lub też polaryzowane, a więc nie ma natury elektromagnetycznej. Odkrył cząstki alfa i beta;
- 1899 – Thomson i Rutherford zademonstrowali, iż radioaktywność wywołuje jonizację;
- 1899 – małżeństwo Curie wymyśliło słowo „radioaktywność” do opisu spontanicznej emisji promieni penetrujących i jonizujących;
- 1899 – Rutherford odkrył toron i nazwał go emanacją;**
- 1900 – Dorn odkrył emanację w szeregu promieniotwórczym ^{238}U , która obecnie znana jest jako radon;**
- 1901 – Rutherford i Brooks dowiedli, że radon jest gazem radioaktywnym;
- 1902 – odkrycie aktywnego złoza toru przez Rutherforda;
- 1902 – Thomson odkrył radon w wodzie kranowej;
- 1903 – Rutherford i Soddy opracowali równanie opisujące rozpad radioaktywny;
- 1904 – Geisel i Debierno odkryli aktynon;
- 1913 – Arnstein podczas autopsji górnika zidentyfikował łuskowate komórki rakowe;
- 1913 – Fajans sformułował regułę przesunięć promieniotwórczych;
- 1914 – pierwsze medyczne zastosowanie radonu;
- 1921 – Uhlig zasugerowała, że emanacja radu może być przyczyną raka płuc;
- 1925 – pierwsze użycie nazwy „radon” w literaturze;
- lata 40-te – wykazano związek radonu z rakiem płuc;
- 1941 – komitet doradczy Narodowego Biura Standardów określił wartość dopuszczalną radonu na 10 pCi/l (370 Bq/m^3)
- 1955 – pierwsza sugestia odnośnie stosowania miary WL (*working level*);
- 1957 – skonstruowanie „komory Lucasa” do wykrywania radonu;
- 1957 – ponowne odkrycie radonu w wodzie kranowej (w Maine);
- 1984 – odkrycie wysokich poziomów radonu w domach w Reading Prong (New Jersey). [1]

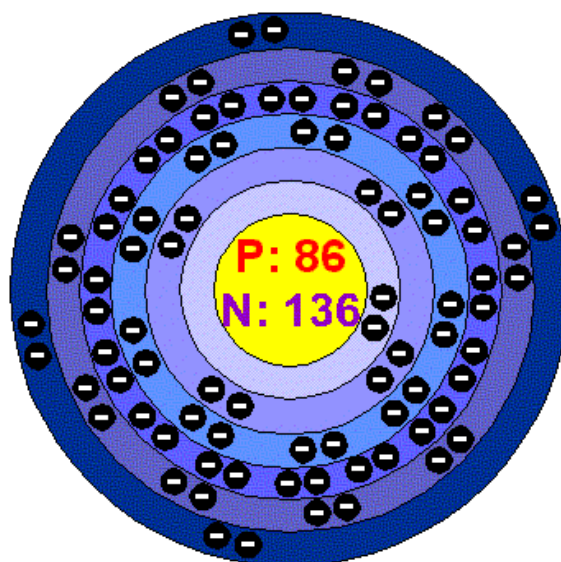
Literatura:

1. C. R. Cothorn, J. E. Smith, Jr. „Environmental Radon”, Environmental Science Research, Volume 35, Plenum Press, New York 1987

2 Dane ogólne na temat radonu



Radon (${}_{86}\text{Rn}$) jest naturalnie występującym, bezbarwnym, świecącym w ciemności, bezwonnym, prawie całkiem chemicznie obojętnym (tworzy klatraty i złożone fluorki), niepolarnym, jednotomowym i radioaktywnym gazem. [1,2,3].



Rys. 2.1 Konfiguracja elektronowa atomu radonu
($1s^2 2s^2p^6 3s^2p^6d^{10} 4s^2p^6d^{10}f^{14} 5s^2p^6d^{10} 6s^2p^6$) [4, 5]

Tabela 2.1 Niektóre właściwości fizyczne ${}^{222}\text{Rn}$. [1]

Właściwość	Wartość
<i>Temperatura wrzenia</i>	-61,8 °C
<i>Temperatura topnienia</i>	-71 °C
<i>Temperatura krytyczna</i>	104 °C
<i>Ciśnienie krytyczne</i>	62 atm.
<i>Gęstość w normalnej temperaturze i ciśnieniu (273K i 101325 N/m²)</i>	9,96 kg/m ³
<i>Objętość 27,03 pCi przy normalnej temperaturze i ciśnieniu</i>	$1,6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^3$
<i>Ciśnienie parowania w temperaturze:</i>	
-144,0 °C	0,13 kPa
-126,3 °C	1,30 kPa
-111,3 °C	5,30 kPa
-99,0 °C	13,00 kPa
-71,0 °C	53,00 kPa

-61,8°C	100,00 kPa
Współczynnik rozpuszczalności* w wodzie przy ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze:	
0°C	0,507
10°C	0,340
20°C	0,250
30°C	0,195
37°C	0,167
50°C	0,138
75°C	0,114
100°C	0,106

*współczynnik rozpuszczalności określono jako stosunek zawartości radonu w wodzie do jego zawartości w powietrzu

W porównaniu z innymi gazami szlachetnymi, radon jest najcięższy i ma najwyższą temperaturę topnienia, wrzenia, krytyczną i ciśnienie krytyczne. [1]

Jest rozpuszczalny w zimnej wodzie, a jego rozpuszczalność spada wraz ze wzrostem temperatury. Ta właściwość radonu powoduje, iż jest on uwalniany do powietrza podczas czynności domowych wymagających użycia wody np. mycia naczyń, prania, kąpieli, splukiwania toalety, sprzątania. [1]

Radon jest rozpuszczalny w wielu związkach organicznych. Współczynniki rozpuszczalności w różnych temperaturach zestawiono w tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Rozpuszczalność ²²²Rn w niektórych związkach organicznych. [1]

Współczynnik rozpuszczalności w:	w 37°C	w 18°C	w 0°C
alkohol bezwodny	-	6,17	8,28
aceton	-	6,30	7,99
alkohol amyłowy	-	10,6	-
anilina	-	3,80	4,45
<u>tłuszcze zwierzęce</u>	<u>5,5 – 6,5</u>	-	-
benzen	-	12,82	-
dwusiarczek węgla	-	23,14	33,4
chloroform	-	15,08	20,5
eter	-	15,08	20,09
kwasy tłuszczowe	3,6 – 7,3	-	-
octan etylowy	-	7,35	9,41
kwask mrówkowy	0,96	-	-
gliceryna	-	0,21	-
heksan	-	16,56	23,4
<u>ludzka krew</u>	<u>0,43</u>	-	-

<u>ludzki tłuszcz</u>	<u>6,33</u>	-	-
kwasy linolowy	6,3	-	-
kwasy oleinowy	6,7	-	-
<u>oliwa z oliwek</u>	-	<u>29,00</u>	-
ciekła parafina	-	9,20	12,6
toluen	-	13,24	18,4
ksylen	-	12,75	-

Znanych jest 27 izotopów radonu od ^{200}Rn do ^{226}Rn . Okres połowicznego rozpadu tych izotopów, z wyjątkiem ^{222}Rn i ^{211}Rn , jest krótszy od godziny. Przykładowe czasy połowicznego rozpadu wybranych izotopów:

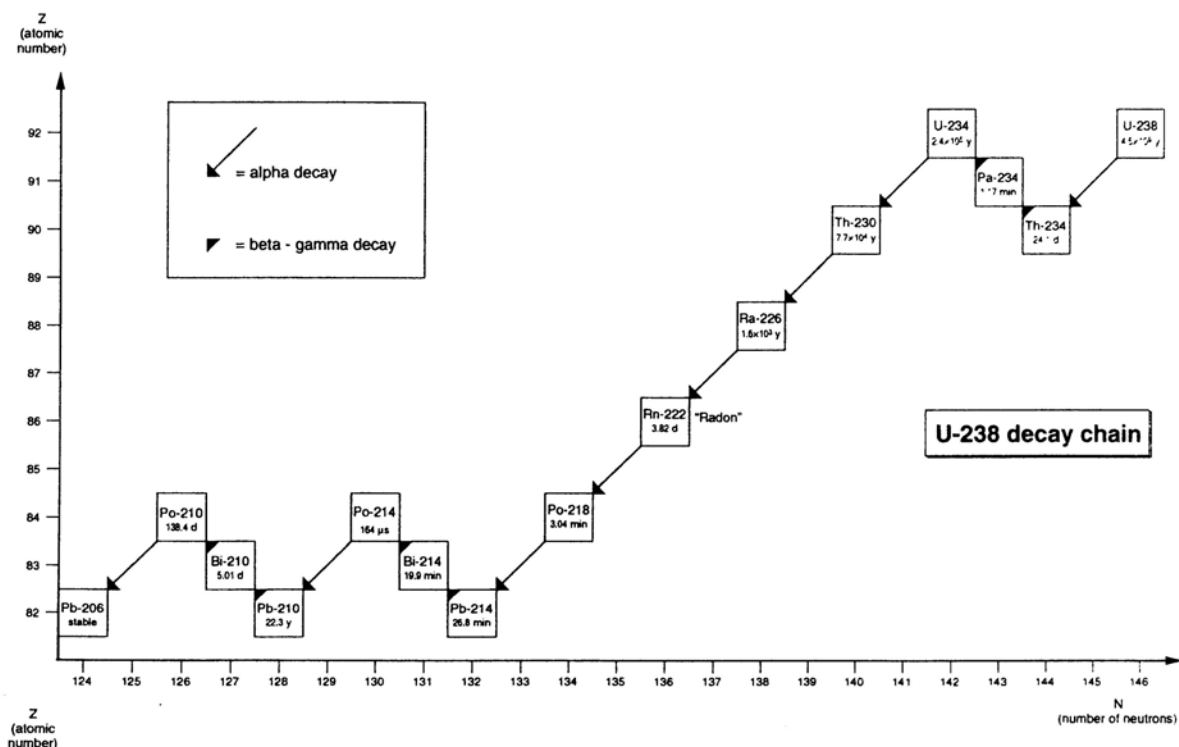
✓ ^{211}Rn	<u>14,6 h</u>
✓ ^{212}Rn	24 min
✓ ^{217}Rn	0,6 ms
✓ ^{218}Rn	35 ms
✓ ^{219}Rn (aktynon)	3,96 s
✓ ^{220}Rn (toron)	55,61 s
✓ ^{222}Rn	3,82 dni [1, 4]

Literatura:

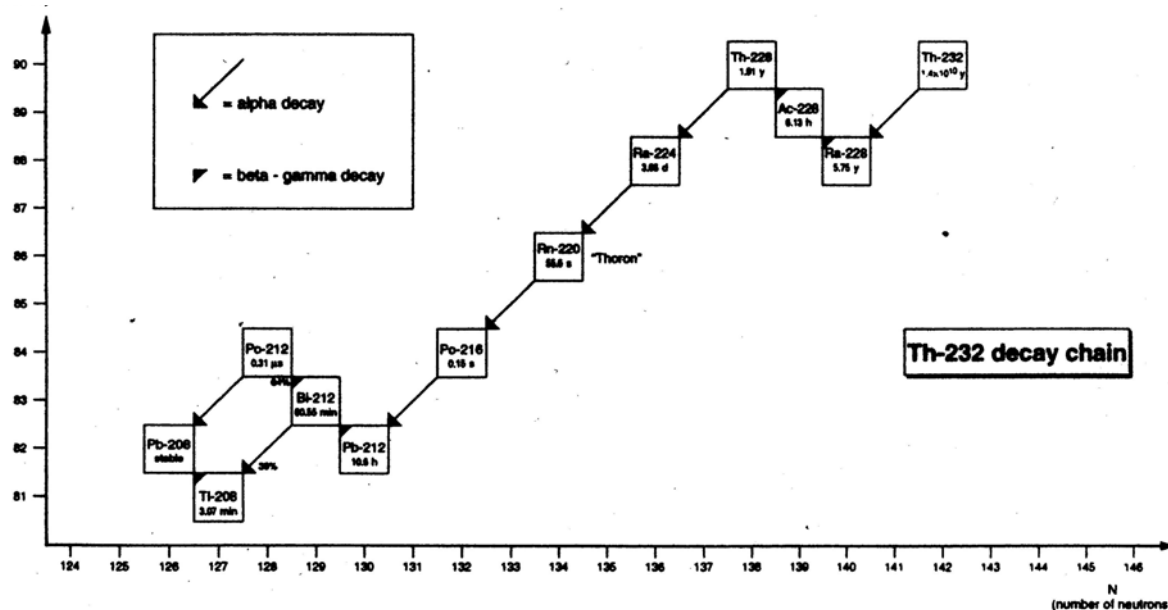
1. C. R. Cothorn, J. E. Smith, Jr. „Environmental Radon”, Environmental Science Research, Volume 35, Plenum Press, New York 1987
2. <http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Lexikon/86Radon.htm>
3. M. Eisenbud, T. Gessell “Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources”, Academic Press, USA, 4th Edition
4. <http://www.chemicalelements.com/elements/rn.html>
5. <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Rn.html>

3 Źródła i występowanie - gdzie jest go najwięcej, mapy

Radon powstaje jako naturalny produkt rozpadu rodziny ^{238}U i ^{232}Th (rys. 3.1 i 3.2) w środowisku geologicznym. Wielkość jego emisji na powierzchni terenu zależy przede wszystkim od budowy geologicznej obszaru, zwłaszcza koncentracji uranu i toru w mediach skalnych i glebach oraz możliwości jego migracji i akumulacji. [1]



Rys. 3.1 Szereg rozpadu promieniotwórczego uranu-238 [2]



Rys. 3.2 Szereg rozpadu promieniotwórczego toru-232 [2]

W procesie formowania się skał magmowych właściwości geochemiczne uranu i toru powodują ich koncentrację w resztkowym członie stopu magmowego bogatym w sód, potas i krzemionkę. Zbliżone promienie jonowe powodują ich współwystępowanie z lantanowcami (uranu z grupą litową, toru z grupą cerową) oraz z cyrkonem w minerałach akcesorycznych. W środowisku skał magmowych uran tworzy często mikroskopijne wrostki w innych minerałach; zwykle jest to uranit UO_2 . Najbardziej uranonośne i toronośne są kwaśne skały magmowe typu

granitoidów, zawierające przeciętnie 3 g/t uranu i 10-25 g/t toru. Na świecie znane są masywy granitoidowe o znacznie wyższych zawartościach uranu, rzędu kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu g/t. W Europie na przykład bogate w uran są: masywy granitoidowe Limuzynii (francuski Masyw Centralny) – do 20 g/t uranu, granitoidy centralnej Szwecji, zawierające 20 g/t uranu i 70 g/t toru oraz granitoidy Kornwalii, zawierające 15-20 g/t uranu.[1]

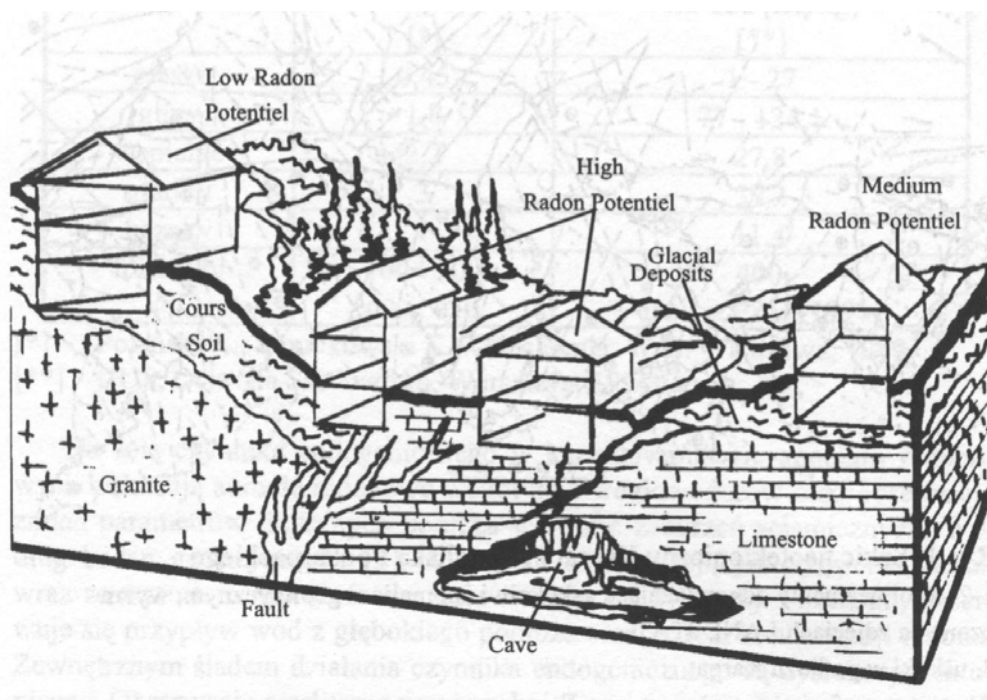
Na obszarze Polski granitoid karkonoski ma cechy granitoidu uranonośnego. Na uwagę zasługują również żyłowe skały – durbachity (zawierające w swym składzie duże ilości hornblendy i biotyty), których potencjał radiogeniczny jest 2-3-krotnie wyższy od skał granitoidowych. Inne typy skał magmowych, a zwłaszcza skały zasadowe i ultrazasadowe, są zdecydowanie uboższe w uran i tor, zawierają zwykle znacznie poniżej 1 g/t uranu i 3 g/t toru. [1]

W warunkach przypowierzchniowych (hipergenicznych) uran ulega utlenianiu i jest, z geochemicznego punktu widzenia, bardzo mobilny. W warunkach redukcyjnych ulega ponownej akumulacji. Wśród skał osadowych najwyższą koncentracją uranu wyróżniają się skały ilaste – średnio 3,7 g/t, a w ich odmianach bogatych w substancję organiczną – tzw. łupkach czarnych – zawartości średnie dochodzą do 130 g/t. Związek uranu z substancją organiczną powoduje jego akumulację we współczesnych torfach. Zdecydowanie ubogie w uran i tor są skały węglanowe i piaszczyste, aczkolwiek w piaskowcach typu *red beds* występują złoża uranu zawierające wysokie koncentracje tego metalu, które do niedawna stanowiły najważniejsze źródło uranu pozyskiwanego górnictwo (m.in. w USA, Nigrze, Francji i Czechach). [1]

W skałach luźnych, tworzących gleby, największe zawartości uranu występują w glinach, zwłaszcza zawierających duże ilości materiału granitowego. W Szwecji w glinach z materiałem granitowym znajduje się od 3,5 do 6,5 g/t uranu. Zdecydowanie niższe koncentracje uranu są notowane w piaskach i żwirach oraz glebach na nich rozwiniętych. [1]

Radon wytworzony w cząsteczkach skały lub gleby uwalnia się do fazy powietrznej lub wodnej między cząsteczkami dzięki energii kinetycznej odrzutu rozpadu jądra radu. Uwolnienie to jest możliwe, gdy atomy radonu leżą blisko powierzchni minerału. Dla scharakteryzowania frakcji radonu, która wydostaje się z ziemi do atmosfery, wprowadzono pojęcie „moc emanacji”. Średnie ważone emanacji radonu na jednostkę powierzchni ziemi wynoszą $1,6 \cdot 10^{-2}$ Bq/(m²·s). Eskalację mocy emanacji radonu z powierzchni ziemi modyfikują czynniki fizyczne, jak np.: porowatość i wilgotność gleby (optymalna 20-30%), wielkość frakcji, warunki na powierzchni ziemi (woda stojąca, śnieg), warunki meteorologiczne. Nagły spadek ciśnienia barometrycznego powoduje zmniejszenie ciśnienia miąższowego gleby i ułatwia ruch radonu do powierzchni. Zwiększenie ciśnienia barometrycznego, na tej samej zasadzie, zmniejsza moc emanacji radonu. Mniejsze znaczenia ma wpływ temperatury, choć jej wzrost zwiększa moc emanacji radonu. Wiatry o dużej szybkości zwiększają moc emanacji, prawdopodobnie przez burzliwą konwekcję blisko powierzchni ziemi, „pompując” radon z ziemi. Duże opady, powodujące znaczne nasiąkanie gleby, mogą hamować moc emanacji radonu przez kilka dni. Ze względu na wpływ różnych czynników na pionowe mieszanie w atmosferze, a przez to także na moc emanacji, jej wartości mogą być niekiedy trudne do interpretacji. [3]

Następnym ważnym, niekiedy decydującym czynnikiem, warunkującym wielkości emisji radonu na powierzchnię terenu jest przebieg stref tektonicznych, uskoków skalnych. W sytuacji, kiedy skały silnie wzbogacone w uran i tor przykryte są szczelnym płaszczem nieprzepuszczalnych skał ilastych, na powierzchni terenu, a ta nas najbardziej interesuje, nie będziemy mieli żadnych emanacji gazowych. Gazy, w tym radon, będą się gromadziły poniżej ekranującej warstwy nieprzepuszczalnej. Często jest jednak sytuacja, że przez dany teren przebiega strefa uskokowa, czyli płaszczyzna tnąca pionowo lub skośnie warstwy skalne, niekiedy na głębokość kilku do kilkunastu kilometrów. Wówczas strefa taka, zawsze charakteryzująca się rozluźnieniem i rozkruszeniem skał w jej obrębie, stanowić będzie znakomitą drogę migracji gazów do powierzchni terenu. Co więcej, przez to, że stanowi ona kolektor zbierający gazy z dużej objętości, emanacje radonowe nad takimi strefami osiągają wielkości wielokrotnie przekraczające emanacje powstające nad skałami występującymi na powierzchni, nawet jeśli zawierają znaczne koncentracje pierwiastków promieniotwórczych. Z tym zjawiskiem stykano się wielokrotnie w czasie prowadzenia prac poszukiwawczych złóż rud uranu w Sudetach. [1]

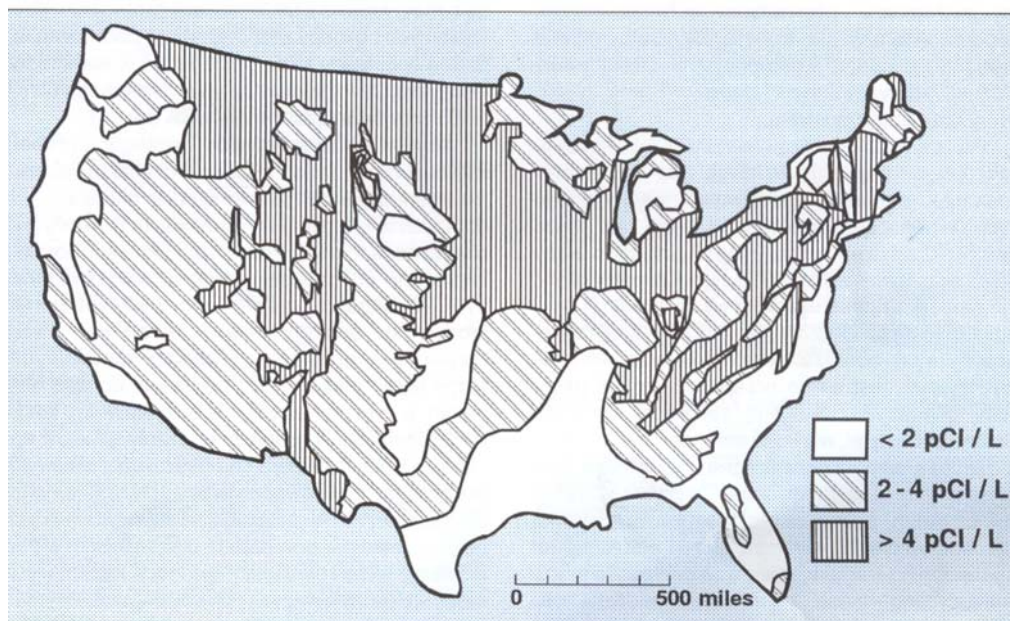


Rys. 3.2 Blokdiagram ilustrujący zagrożenie radonowe w środowisku [4]

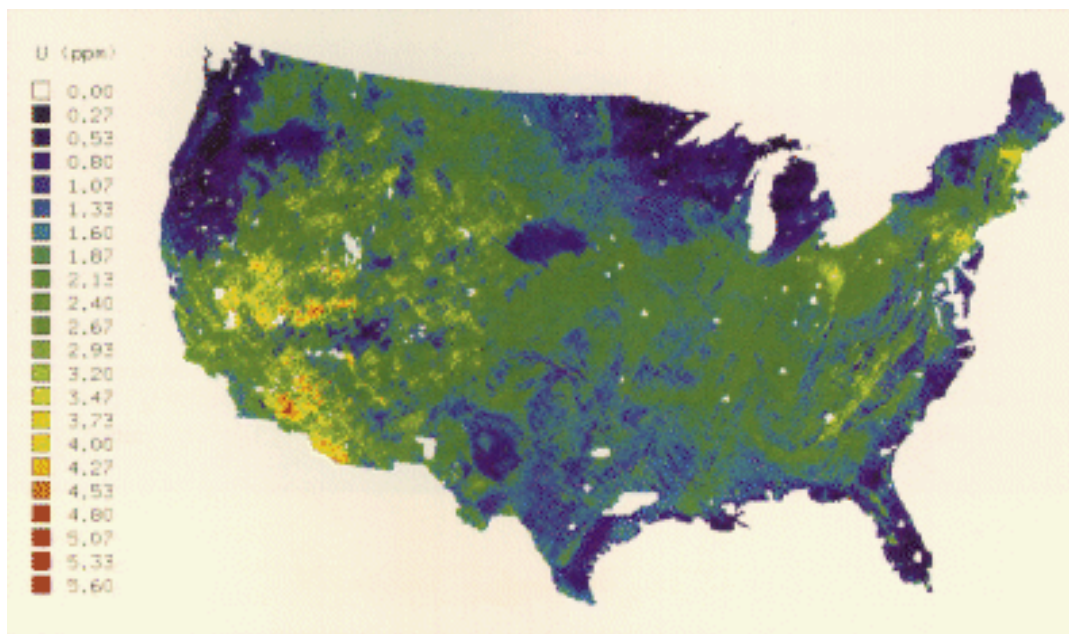
High Radon Potential	wysoki potencjał radonowy
Medium Radon Potential	średni potencjał radonowy
Low Radon Potential	niski potencjał radonowy
Glacial Deposits	osady polodowcowe
Cours Soil	warstwa gleby
Limestone	wapień
Cave	jaskinia (kras)
Granit	granit
Fault	uskok (szczelina, intruzja)

Jeżeli na powierzchni terenu występować będą utwory gruboklastyczne – piaski z niewielką domieszką frakcji ilastej, żwiry lub lessy, możemy się spodziewać znacznych wartości emanacji z podłoża. Co więcej, utwory te mogą gromadzić znaczne ilości gazów w przestrzeniach porowych. Z problemami tymi na co dzień stykają się badacze szwedzcy, badając wielkość emanacji na polodowcowych utworach fluwialnych, pokrywających podłoże zbudowane z granitoidów. Podobne zjawisko – podwyższonych koncentracji radonu w osadach gruboklastycznych tarasów rzecznych – opisywane jest z obszaru Czech i Szwecji. W Polsce z tego typu emanacjami możemy zetknąć się na obszarze Sudetów i Karpat. [1]

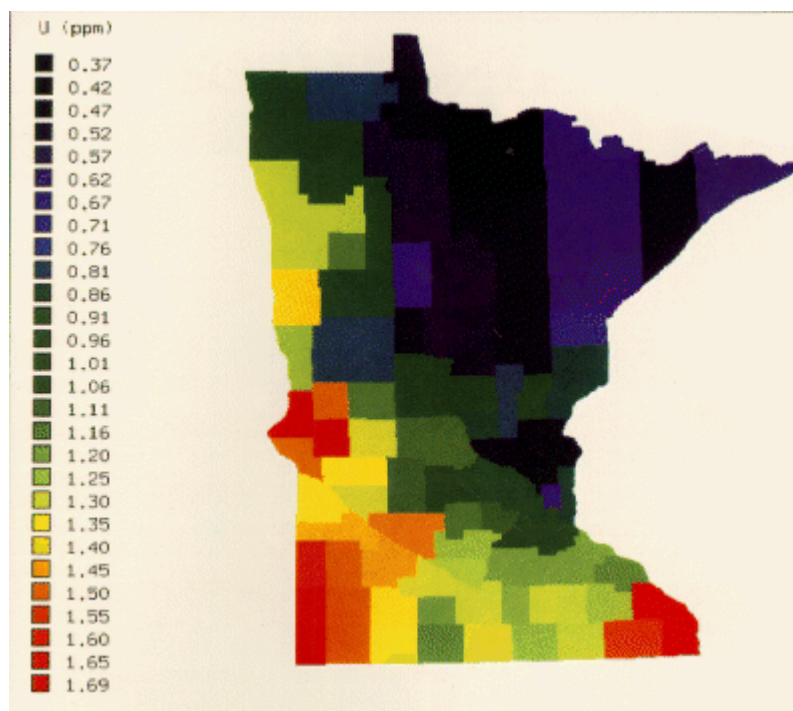
Opracowanie map prognozujących wielkość emanacji radonu następuje na podstawie analizy istniejących materiałów geologicznych. W analizie takiej do podstawowych materiałów należą szczegółowe mapy geologiczne i hydrogeologiczne. Ważne są dane uzyskiwane w trakcie prowadzenia prac poszukiwawczych rud uranu, które bezpośrednio wskazują na obecność uranu w badanym obszarze. Przykłady takich analiz znane są z wielu krajów. Efektem analiz materiałów geologicznych są mapy geologicznego potencjału radonowego. Mapy takie posiada już wiele krajów. Pod wieloma względami za wzorcowe mogą uchodzić mapy sporządzone dla USA (rys. 3.4, 3.5, 3.6). [1]



Rys. 3.4 Mapa potencjału radiogenicznego Stanów Zjednoczonych [1]



Rys. 3.5 Mapa Stanów Zjednoczonych wykonana na podstawie monitoringu napowietrznego przeprowadzonego przez U.S. Geological Survey w 1970 r. dla programu National Uranium Resource Evaluation [5]



Rys. 3.6 Mapa hrabstwa Minnessota ilustrująca średnie wartości „równoważnika uranu” w ppm, które są proporcjonalne do zawartości radu w glebie. Badacze LBL zauważyli, że te stężenia są bardzo silnie powiązane z zawartością radonu w powietrzu wewnętrznym. [5]

Stężenie radonu w powietrzu jest największe przy powierzchni ziemi. Jednakże wpływ pionowego mieszania w atmosferze – wiatry i turbulencje – powoduje zmianę stężenia radonu nawet w miejscach stałej wartości mocy emanacji. Stężenia radonu w atmosferze podlegają zmianom sezonowym i dobowym. Maksymalne stężenia obserwuje się w okresie letnim –

minimalne w zimowym. Zmiany dobowe – maksima w nocy, a minima w południe – są zależne od zmian stabilności atmosfery. Uogólnione wartości stężenia radonu w powietrzu wynoszą nad:

- ✓ kontynentami 3,72 Bq/m³,
- ✓ wyspami i brzegiem mórz 0,37 Bq/m³,
- ✓ oceanami 0,037 Bq/m³.

Średnie wartości stężeń radonu w powietrzu atmosferycznym kraju różnią się dość znacznie. Tak np. w Kowarach stężenie radonu wynosi 30 Bq/m³, w Karpaczu 8,7, w Świeradowie 24,1, a w Warszawie 2,7 Bq/m³. [3]

W Polsce badania nad zagrożeniami emanacji radonowych ze środowiska geologicznego były prowadzone w ograniczonym zakresie. Państwowy Instytut Geologiczny wspólnie z Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej opracował program badań, którego realizacja pozwoli wyodrębnić obszary zagrożone ryzykiem emanacji radonu z podłoża do budynków i kontrolować jego koncentracje w obszarach najbardziej zagrożonych. Więcej szczegółów na ten temat w punkcie 6.2.1. [1]

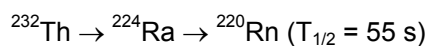
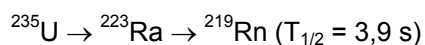
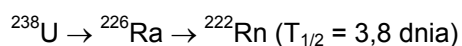
Literatura:

1. R. Strzelecki, S. Wołkowicz „Geologia a powstawanie emanacji radonowych”, Postępy Techniki Jądrowej, Vol. 36, Z. 1-2, Warszawa 1993
2. F. Bochicchio, J. P. McLaughling, S. Piermattei “Radon in indoor Air”, European Comission Directorate-General for Science, Research and Developmen, Joint Research Centre- Environmmt Institute, Report EUR 16123 EN, Luxemburg 1995
3. Z. Szot „RAD I RADON w środowisku oraz skutki ich wniknięcia do organizmu człowieka”, Postępy Techniki Jądrowej, Vol. 36, Z. 1-2, Warszawa 1993
4. A. Pawuła „Przyczynek do geologii radonu”, XVII Szkoła Jesienna, Materiały Konferencyjne, Zakopane 22-26 września 1997
5. <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Research-Review/Highlights/1993/radon-risk.html>

4 Dlaczego radon jest problemem – jakie stanowi zagrożenie dla człowieka i dlaczego?

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowanie narażeniem populacji na radon i produkty pochodne. Czyni się próby oceny ryzyka występowania nowotworów płuc w wyniku ekspozycji na radon i jego pochodne w pomieszczeniach. Dotychczasowe wyniki nie są jednoznaczne, prawdopodobnie dlatego, że chodzi o efekt małych dawek promieniowania, z którymi interferują inne czynniki o działaniu kancerogennym, jak np. dym papierosowy i środki drażniące. Innymi czynnikami wpływającymi w różnym stopniu na te oceny są problemy socjalne, przyzwyczajenia życiowe oraz industrializacja, która jest powiązana z występowaniem nowotworów płuc. [1]

Izotopy radonu powstają w trzech naturalnych szeregach promieniotwórczych (patrz też punkt 3):



Ze względu na krótki okres połowicznego rozpadu ^{219}Rn i ^{220}Rn największe znacznie ma ^{222}Rn . Wnika on do ustroju drogą wziewną, napromieniowując nabłonek dróg oddechowych, indukując nowotwory płuc, co zaobserwowano u górników w kopalniach uranu. [1]

Wszystko zaczęło się od górników...

W XV w. opisano chorobę występującą u górników kopalni w Schneebergu w Niemczech i w Joachimstahlu w Czechach. W 1878 r. choroba została rozpoznana jako rak płuc. W 1921 r. wyrażono przypuszczenie, że przyczyną nowotworów płuc u górników wymienionych kopalń jest wdychanie radonu (patrz punkt 1). Pomocą w wyjaśnieniu skutków biologicznych inhalacji radonu były badania laboratoryjne przeprowadzone na zwierzętach. W uniwersytecie Rochester Shapiro i Pale, a także Cohn i in. eksponowali zwierzęta na różne stężenia radonu w obecności i nieobecności produktów pochodnych związanych z aerozolem. Doszli oni do wniosku, że ponad 95% wartości dawki w nabłonku dróg oddechowych pochodzi od produktów pochodnych radonu – ^{218}Po i ^{214}Po – związanych z aerozolem. Nowotwory płuc obserwowano głównie u zwierząt eksponowanych na produkty pochodne radonu. Badania przeprowadzone w następnych latach w różnych ośrodkach Ameryki i Europy stworzyły podstawy do określenia wielu parametrów fizycznych i biologicznych, niezbędnych do opracowania modeli umożliwiających obliczenia dawki w komórkach „tarczach” układu oddechowego. [1]

W okresie powojennym zainicjowano badania epidemiologiczne, dotyczące częstości występowania nowotworów płuc wśród górników, którzy w czasie pracy pod ziemią byli narażeni na działanie radonu. Badaniem objęto górników kopalń uranu w: Colorado USA, Nowym Meksyku USA, Ontario Kanada, Francji oraz górników kopalni rud żelaza w Szwecji i kopalni fluorytów Nowej Fundlandii Kanada. Badania te obejmowały trzydzieści kilka tysięcy osób. [1]

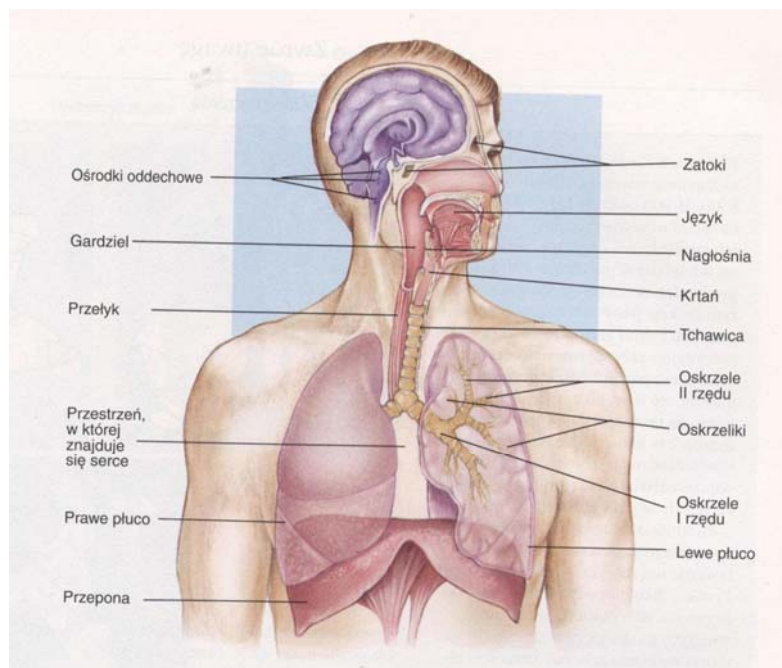
Średnia skumulowana ekspozycja była najwyższa u górników kopalni Colorado – ok. 500 WLM*, a najniższa w kopalni Beaverlodge i wynosiła około 40 WLM. Wzrost częstości występowania śmiertelnych przypadków raka płuc stwierdzono u górników o skumulowanej ekspozycji powyżej 100 WLM. Występowanie nowotworów płuc jest uzależnione od wartości całkowitej dawki, lecz wydaje się, że jej natężenie może także odgrywać pewną rolę. Nowotwory płuc rzadko występowały przed 40 rokiem życia. Okres utajenia wynosił od kilku do 50 lat, średnio 20-30 lat. Na ogół krótszy okres utajenia występował u górników, którzy narażenie na radon rozpoczynali w starszym wieku, jak również u palaczy tytoniu.

*WLM jest ekspozycją w ciągu 170h na stężenie 1WL (*working level*) krótkożyciowych produktów pochodnych ^{222}Rn w 1l powietrza, powodujących emisję $1,3 \cdot 10^5 \text{ MeV}$ energii α . WLM przedstawia skumulowaną ekspozycję w płucach na potencjalną energię α . Ostatnio stosuje się jednostkę $\text{Bq} \cdot \text{h} / \text{m}^3$, $1 \text{ WLM} = 6,29 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{h} / \text{m}^3$

Co wiemy teraz?

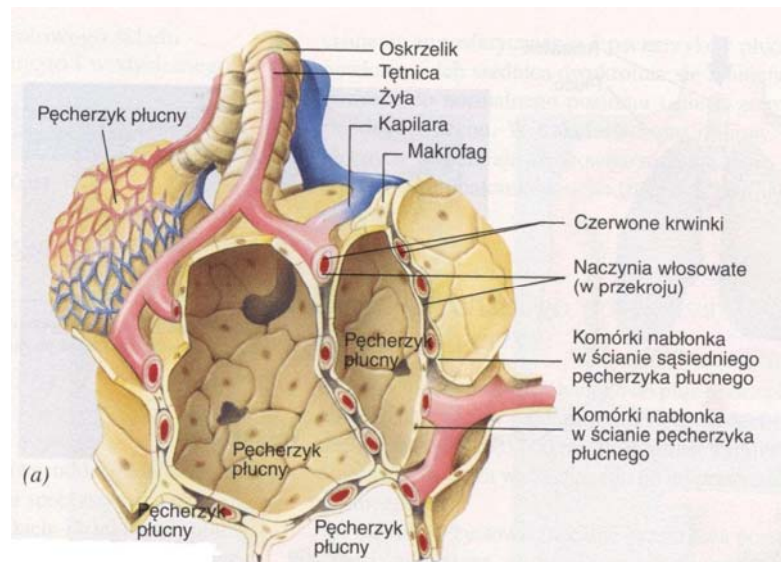
Ponieważ radon w formie gazowej trafia do organizmu człowieka razem z powietrzem, trafia w rezultacie do płuc. Układ oddechowy jest więc najbardziej narażony na niszczycielskie oddziaływanie radonu i jego pochodnych, ponieważ właśnie tam przebywają one najdłużej. Celowe jest więc zapoznanie się z jego budową.

Układ oddechowy człowieka zbudowany jest z płuc i dróg oddechowych, którymi powietrze wędruje do pęcherzyków płucnych i z powrotem. Drogi oddechowe obejmują nozdrza, jamę nosową, gardziel, krtani i tchawicę, która rozgałęzia się na dwa oskrzela – lewe i prawe, prowadzące do płuc (rys. 4.1). [2]



Rys. 4.1 Układ oddechowy człowieka [2]

W płucach oskrzela dzielą się na liczne odgałęzienia – oskrzeliki, te zaś rozgałęziają się wielokrotnie, przechodząc w oskrzeliki oddechowe. Oskrzeliki oddechowe rozdzielają się na kilka przewodów oddechowych, które kończą się ślepo w woreczkach oddechowych. W ścianach przewodów oddechowych i w ścianach woreczków oddechowych znajdują się uwypuklenia, zwane pęcherzykami płucnymi (rys. 4.2). Pęcherzyki otacza gęsta sieć naczyń włosowatych. Przez ścianki pęcherzyków zachodzi wymiana tlenu i dwutlenku węgla pomiędzy krwią i powietrzem w pęcherzykach płucnych. [2]



Rys. 4.2 Budowa pęcherzyków płucnych [2]

A oto droga, którą powietrze trafia do pęcherzyków płucnych [2]

→ *nozdrza zewnętrzne (przednie)* → *jama nosowa* → *gardziel* →
 → *krtani* → *tchawica* → *oskrzela* → *oskrzeliki* → *pęcherzyki płucne*

Powietrze wdychane nosem lub ustami, dociera do gardzieli. Powietrze przechodzące przez jamę nosową jest wstępnie filtrowane, zwilżane i ogrzewane do temperatury ciała. Nozdrza otwierają się do jamy nosowej, wysłanej błoną śluzową pokrytą wielowarstwowym nabłonkiem migawkowym. Błona śluzowa jest silnie unaczyniona i zawiera liczne komórki wydzielające śluz; dzięki temu powietrze przechodzące z jamy nosowej do dalszych odcinków dróg oddechowych jest już oczyszczone, nasycone parą wodną i ogrzane. Kurz, bakterie i inne obce cząstki wdychane z powietrzem zatrzymywane są w warstwie śluzu i wraz ze śluzem przemieszczane w kierunku gardzieli ruchami rzęsek nabłonka migawkowego. W ten sposób obce cząstki wraz ze śluzem dostają się do układu pokarmowego, który znacznie sprawniej się ich pozbywa niż delikatna tkanka, z której zbudowane są płuca. [2]

Droga oddechowa prowadzi dalej z jamy nosowej do jamy gardła, a otwór w dnie gardzieli prowadzi do krtani. Z krtani powietrze przechodzi do tchawicy, która dzieli się na dwa oskrzela główne, prawe i lewe, prowadzące do obu płuc. Błona śluzowa wyściełająca wnętrze tchawicy jest pokryta nabłonkiem migawkowym. Wiele cząstek, które nie zostały zatrzymane wcześniej w jamie nosowej i krtani zatrzymywanych jest tutaj. Śluz wraz z tymi cząsteczkami jest kierowany do jamy gardła dzięki uderzeniom rzęsek i co pewien czas połykany. Ten mechanizm broni obcym cząstkom dostępu do płuc. [2]

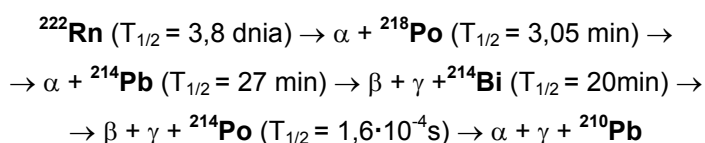
Tak wielostopniowy system oczyszczania wdychanego powietrza nie chroni jednak człowieka przed szkodliwym działaniem radonu.

- ✓ Część wdychanego radonu rozpuszcza się w śluzie i zostaje przesunięta przez poruszające się rzęski do krtani. W czasie przebywania w tym obszarze układu oddechowego napromieniowane zostają komórki nabłonka. Po zadrażnieniu śluzówki

krtań materiał promieniotwórczy w wyniku kaszlu może być wydany na zewnątrz lub pochłonięty, przechodząc do przewodu pokarmowego.

- ✓ Aerosol, który przedostał się do końcowej części układu oddechowego, a więc dotarł aż do przewodów pęcherzykowych i dalej do woreczków pęcherzykowych, usuwany jest przez komórki żerne (makrofagi). Komórki wędrują w kierunku oskrzelików pokrytych śluzem, który jest przesuwany ruchem rzęsek w stronę przetyku. Inna droga oczyszczania w tej części płuc, to przechodzenie komórek żernych ze sfagocytowanym materiałem do naczyń i gruczołów limfatycznych.
- ✓ Część radonu pozostaje jednak na powierzchni nabłonka i zostaje wchłonięta przez naczynia włosowate do krwi. [1]

Największe zagrożenie chorobą nowotworową wywołują 4 pierwsze stałe produkty rozpadu radonu:



Są one niebezpieczne, ponieważ wiążą się z wilgocią, kurzem i z tego powodu mogą osiadać w płucach, narażając nabłonek oskrzeli na działanie cząstek α emitowanych przez ^{218}Po i ^{214}Po . [3]

Powszechna obecność w powietrzu szlachetnego α radioaktywnego gazu radonu, który wraz z produktami pochodnymi jest źródłem napromienienia płuc człowieka, zarówno w pracy jak i wszędzie poza pracą, zmusza do poznania skutków tego napromienienia. O ile w przeszłości przedmiotem zainteresowania było zagrożenie dla człowieka w miejscu pracy, głównie w kopalniach, o tyle obecnie od kilku lat uwagę skupia stężenie radonu w budynkach mieszkalnych oraz ocena zagrożenia. Podstawą do oceny ryzyka od inhalacji radonu i produktów pochodnych są obecnie wyniki badań epidemiologicznych górników kopalni uranu. Od początku lat 50 wiadomo było, że wielkość dawki w nabłonku oskrzeli pochodziła głównie od produktów pochodnych radonu – frakcji związanej z aerozolem, jak również frakcji niezwiązanej. Ponieważ oznaczenie tych frakcji było kłopotliwe, wprowadzono od 1957 roku pomiar potencjalnego stężenia energii α do kontroli warunków pracy w kopalni z jednostką WL (*working level*) oraz WLM (*working level month*) jako skumulowaną ekspozycję. [1]

Od ponad 20 lat usiłuje się obliczyć dawkę na komórki nabłonka płuc ze znanej wielkości skumulowanej ekspozycji u górników w czasie pracy w kopalni. Z badań epidemiologicznych górników kopalni uranowych wynika, że wzrost śmiertelnych nowotworów płuc występował po skumulowanej ekspozycji równej około 100 WLM. Po uwzględnieniu współczynnika równowagi, ekspozycji tej odpowiada dawka w oskrzelach 6,0 – 20,0 Sv. Średnia skumulowana roczna ekspozycja ludzi na radon i produkty pochodne w pomieszczeniach w USA jest oceniana na ok. 0,2 WLM, a w ciągu życia na 15 WLM. Ze względu na różnicę w fizycznej aktywności górników i ludzi w domach uważa się, że współczynnik konwersji dla tych ostatnich powinien wynosić od $\frac{1}{2}$ do $\frac{3}{4}$ wartości przyjmowanych dla górników. Wykonane obliczenie wykazuje, że dawka w komórkach nabłonka oskrzeli ludności jest o współczynnik 3-10 niższa od poziomu, od którego

następuje wzrost częstości występowania nowotworów u górników. Należy jednak pamiętać, że znajomość dawki promieniowania nie rozwiązuje wszystkich problemów. Badane grupy są bowiem poddane wpływom jeszcze innych czynników. [1]

Nie jest jednoznaczna interpretacja korelacji pomiędzy częstością zapadania na nowotwory płuc i ekspozycją zawodową w kopalniach rud uranowych. Zależność ta wykazuje wysycenie dla wysokich poziomów ekspozycji, lub wręcz spadek zapadalności w wysokich dawkach. Ponadto poziom tego wysycenia jest różny dla górników pracujących w różnych kopalniach. Próby wyjaśnienia i interpretacji tej zależności są różne. Wprowadzane są różne modele mikrodozymetryczne, ale zróżnicowane i skomplikowane warunki ekspozycji i rozbieżności pomiarowe są powodem trudności w ocenie dawek i mocy dawek. [4]

W najgroźniejszych przypadkach narażenie na działanie radonu jest porównywalne z nałogiem palenia tytoniu. Znalaziono bowiem dowody na istnienie synergizmu między paleniem tytoniu i narażeniem na działanie Rn (szkodliwość działania Rn i papierosów łącznie jest większa niż sumaryczne efekty wynikające z ekspozycji na działanie Rn i palenia tytoniu). Ryzyko wystąpienia raka płuc u palaczy narażonych na działanie radonu jest prawdopodobnie 6-10 razy wyższe, niż w przypadku osób niepalących (tabela 4.1). [3,5]

Tabela 4.1 Roczna umieralność na raka płuc w USA (dane z 1986 r. [3])

	<i>Populacja</i>	<i>Wszystkie przypadki śmierci na raka płuc</i>	<i>Przypadki wywołane przez Rn</i>
Mężczyźni			
<i>nigdy nie palący</i>	63 900 000	1 900	200
<i>nałogowi palacze</i>	9 000 000	22 900	3 100
Kobiety			
<i>nigdy nie palące</i>	81 300 000	3 100	300
<i>nałogowe palaczki</i>	5 300 000	7 900	1 100

Pod koniec lat 90-tych twierdzono również, iż kobiety są bardziej odporne i rzadziej występuje u nich rak płuc. Jednakże ze względu na upowszechnianie się nałogu palenia tytoniu szacowano, iż wśród palaczy do roku 2000 płeć przestanie odgrywać rolę i zarówno kobiety, jak i mężczyźni palący w takim samym stopniu będą narażeni na zachorowanie na raka płuc. Jeśli chodzi o dzieci, to szacowano, iż dziesięciolatki są 1,5 do 2 razy bardziej wrażliwe na szkodliwe skutki działania wdychanego radonu i jego pochodnych niż dorośli. [6]

Narodowa Rada Ochrony Radiologicznej (National Radiological Protection Board) sugeruje natychmiastowe środki zaradcze, jeżeli stężenie radonu przekracza 400 Bq/m³. Ten poziom zagrożenia odpowiada 2%-owemu ryzyku śmierci na raka płuc u niepalących, stosunkowo małemu w porównaniu z zagrożeniem palaczy, co stanowi około 20% ryzyka wszystkich osób. [3]

Badania Centrum Onkologii w Warszawie wskazują, że w Polsce pośród mężczyzn chorych na raka płuc i krtani 70-90% stanowią palacze i ocenia się, że 80-90% nowotworów płuc u mężczyzn pochodzi z palenia tytoniu. Z badań krakowskiego Centrum Onkologii Wynika, że urbanizacja i skażenia przemysłowe atmosfery nie odgrywają istotnej roli w powstawaniu raka płuc. Oznacza to, że powodem około 10-20% raka płuc u mężczyzn niepalących są bliżej nieokreślone przyczyny naturalne. Natomiast wpływ radonu na powstawanie tych nowotworów jest znikomy lub żaden. [7]

Zgodnie z oceną Komitetu Naukowego Narodów Zjednoczonych ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR, 1997) **średnie stężenie radonu w powietrzu w mieszkaniach, jakie występuje w Polsce (około 40 Bq/m³), może prowadzić do 35 – 80 zgonów z powodu raka płuc na 1 milion osób w ciągu 70 lat.** Odpowiada to w całej populacji Polski około 1800 – 4080 zgonom w ciągu 70 lat, co stanowi 0,14 - 0,32% normalnej liczby zgonów na raka płuc w Polsce (wynoszącej ponad 1 280 000/70 lat). [7]

Zakładając, że 1% ludności Polski narażony jest na dziesięciokrotnie wyższe stężenie radonu (400 Bq/m³), zgodnie z przewidywaniami UNSCEAR moglibyśmy oczekiwać w tej grupie ludzi 2,6 do 5,6 dodatkowych zgonów z powodu raka płuc rocznie. W populacji tej (około 400 000 osób) na raka płuc umarły w roku 1993 wskutek palenia papierosów i przyczyn naturalnych 324 osoby. [6]

Dominującą przyczyną zgonów na raka płuc w Polsce jest palenie tytoniu!!!! Wpływ radonu nawet zgodnie z bardzo pesymistyczną oceną UNSCEAR, jest niemal niewykrywalny. [7]

Ocena UNSCEAR, dokonana przed dwudziestu laty, oparta jest na nadmiernie ostrożnym założeniu liniowego, bezprogowego oddziaływania promieniowania na organizm, z którego wynika, że nawet najmniejsza dawka promieniowania może być szkodliwa. Obecnie założenie to jest poważnie kwestionowane, a raport UNSCEAR z roku 1994 wskazuje, że małe dawki promieniowania są wręcz dobroczynne. [7]

W wielu badaniach *in vitro* wykazano, że ekspozycja na działanie czynnika genotoksycznego w niewielkim stężeniu, czy napromienienie komórki małą dawką pobudza naprawcze procesy komórkowe. Jeżeli na pobudzoną komórkę zadziała inny silny czynnik genotoksyczny, to wywoła on skutek znacznie słabszy od spodziewanego. Badania *in vitro* prowadzone przez Sheldona Wolfa wykazały, że dzielące się komórki, napromienione niską dawką promieniowania X i eksponowane 24 godziny później na promieniowanie emitowane z gazowego radonu wydzielającego się z ²²⁶Ra i jego produktów rozpadu, wykazały ponad dwukrotnie niższą częstość aberracji niż indukowane taką samą ekspozycją radonu, ale bez wstępnego napromienienia promieniowaniem X. Ekspozycja na niewielką dawkę promieniowania X obniżyła skuteczność promieniowania emitowanego z radonu. [4]

Spśród licznych badań wpływu obecności radonu w mieszkaniach na powstawanie nowotworów płuc największe przeprowadzono w Stanach Zjednoczonych. Wykonane w tym badaniu pomiary radonu w mieszkaniach były reprezentatywne dla blisko 90% ludności. W rejonach o średnim poziomie radonu w domach (wyższym od 250 Bq/m³) umieralność mężczyzn

na raka płuc była dwukrotnie mniejsza niż w rejonach, gdzie średnie stężenie radonu nie sięgało 40 Bq/m³. [6]

Cohen i Colditz (1994) także stwierdzili ujemną korelację między umieralnością na raka i średnim poziomem radonu w USA oraz brak dowodów na wywoływanie chorób nowotworowych przez małe dawki promieniowania. Haynes wykazał ujemną korelację również w wielkiej Brytanii, gdzie rozkład geograficzny przypadków zachorowań na raka nie pokrywa się z obszarami o najwyższym poziomie radonu. [3]

Literatura:

1. Z. Szot „RAD I RADON w środowisku oraz skutki ich wniknięcia do organizmu człowieka”, Postępy Techniki Jądrowej, Vol. 36, Z. 1-2, Warszawa 1993
2. Solomon, Berg, Martin, Villee „Biologia”, MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1996
3. B.J. Alloway, D.C Ayres „Chemiczne podstawy zanieczyszczenia środowiska”, PWN, Warszawa 1999
4. A. Cebulska-Wasilewska „Skutki biologiczne ekspozycji na radon i produkty jego rozpadu”, XVII Szkoła Jesienna, Materiały Konferencyjne, Zakopane 22-26 września 1997
5. F. Bochicchio, J.P. McLaughling, S. Piermattei “Radon in indoor air”, report No 15, European Commission, Directorate-General for Science, Research and Development, Joint Research Centre-Environment Institute, 1995
6. C. R. Cothorn, J. E. Smith, Jr. „Environmental Radon”, Environmental Science Research, Volume 35, Plenum Press, New York 1987
7. Z. Jaworowski „Radon i rak”, PTJ, Vol. 41, Z.1 1998

5 Sposoby i urządzenia pomiarowe

Istnieje kilka różnych metod pomiaru stężenia radonu i jego pochodnych, które można podzielić na:

- ✓ pomiary chwilowe – otrzymana wartość odzwierciedla warunki panujące jedynie w minucie/minutach, w których próbka powietrza została pobrana;
- ✓ pomiary skomasowane – oznacza to, że wynikiem takich pomiarów jest średnia wartość stężenia radonu lub produktów jego rozpadu z okresu, w którym wykonywano pomiary (z kilku dni lub miesięcy);
- ✓ pomiar ciągły – urządzenia pomiarowe w sposób ciągły podają wartość średnią z założonego okresu czasu np. z 5 min, z 60 min itp. [1]

Szwedzki Instytut Ochrony Radiologicznej opracował przepisy na temat sposobów przeprowadzania pomiarów i przygotował opisy metod działania kilku typów urządzeń pomiarowych, które stanowią podstawę do opracowania tego punktu. [1]

Obecnie opisano 8 metod takich, jak:

- ✓ pomiary przy użyciu detektora śladów cząstek alfa w pojemniku z wykładziną filtracyjną;
- ✓ pomiary przy użyciu otwartego detektora cząstek alfa;

- ✓ pomiary przy użyciu aktywnego węgla drzewnego i spektrometrii gamma;
- ✓ pomiary przy użyciu aktywnego węgla drzewnego i TLD (*Thermo-Luminescence Dosimeter* = dozymetru termoluminescencyjnego);
- ✓ skomasowane pomiary przy użyciu miernika wzorowanego na TLD;
- ✓ pomiary z ciągłym zapisem na filtrze;
- ✓ pomiary z ciągłym zapisem gazu radonowego;
- ✓ pomiary przy użyciu skomasowanego elektretowego miernika radonu. [1]

Pomiary, których celem jest oszacowanie średniej rocznej wartości stężenia radonu w pomieszczeniach powinny być prowadzone w zimnych porach roku, gdy mieszkania są ogrzewane. Jest to szczególnie istotne w przypadku budynków z systemem wentylacji naturalnej, ponieważ wentylacja i wietrzenie są trudne do skontrolowania w okresie ciepłym. Pomiary wykonywane w lecie są również niereprezentatywne, gdy radon może przedostawać się z gruntu do budynku. [1]

W czasie okresu pomiarowego system wentylacyjny powinien działać w sposób prawidłowy. Czasem jest więc niezbędne przeprowadzenie remontów, również w przypadku wentylacji naturalnej. Należy zwrócić szczególną uwagę na to, czy:

- ✓ istniejące czerpnie i wyrzutnie powietrza są otwarte tak, jak być powinny;
- ✓ przewody wentylacyjne nie są zatkane, brudne;
- ✓ wentylatory (jeśli są) działają prawidłowo. [1]

Należy również sprawdzić wentylację w pokojach, w których wykonywane będą pomiary – jakie są przepływy z i do pomieszczeń zamkniętych itp. [1]

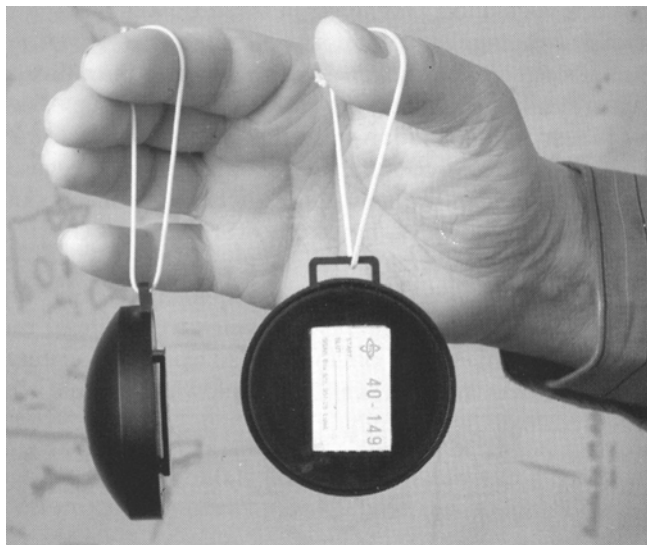
Pomiary powinny być prowadzone w dwóch najczęściej używanych pomieszczeniach, ale nie w kuchni, czy pomieszczeniach wilgotnych (WC, łazienka itp.). Jeżeli mieszkanie/dom ma więcej niż jedną kondygnację, to pomiary powinny zostać wykonane przynajmniej w jednym pomieszczeniu na każdym piętrze. Urządzenie pomiarowe powinno zostać umieszczone w pomieszczeniu w taki sposób, aby otrzymane wyniki były jak najbardziej reprezentatywne dla całego pomieszczenia. [1]

Przy pomiarach mających na celu określenie średniej rocznej okres pomiarowy powinien być dłuższy niż 2 miesiące. Jeżeli zaś informacja potrzebna jest szybciej, np. w przypadku podejmowania decyzji o kupnie domu, wówczas minimalny czas pomiaru to 48 godzin przy pomiarach ciągłych z wynikami co 60 minut lub 7 dni dla innych sposobów pomiarowych. Im dłuższy jest czas pomiaru, tym bardziej dokładne i odzwierciedlające rzeczywistość są uzyskane wyniki. [1]

W przypadku nowo wybudowanych budynków, jeśli jest to niezbędne, pomiary sprawdzające, czy wartość stężenia radonu wewnątrz nie przekracza 200 Bq/m^3 mogą zostać przeprowadzone również poza sezonem grzewczym. Jednakże przy założeniu, że budynek wyposażony jest w wentylację mechaniczną i jeszcze nie został zasiedlony. Jeśli budynek taki usytuowany jest na glebie łatwo przepuszczalnej dla powietrza, pomiary powinny zostać wykonane, albo przynajmniej powtórzone, w sezonie grzewczym. [1]

Poniżej zamieszczono krótki opis najczęściej stosowanych metod i przyrządów pomiarowych.

Detektory śladów cząstek alfa są najczęściej wykorzystywane do wykonywania pomiarów. W tej metodzie cząstki alfa wypromieniowane z radonu i pochodnych jego rozpadu uderzają w powierzchniową warstwę błonki z poliestru lub azotanu celulozy i powodują w niej zniszczenia (zostawiają ślady). Ślady te stają się widoczne po chemicznym wytrawieniu błonki i dzięki temu mogą zostać policzone pod mikroskopem. Liczba śladów na jednostkę powierzchni jest proporcjonalna do zawartości izotopów ulegających rozpadowi alfa w objętości powietrza w zasięgu cząstek alfa i do czasu pomiaru. Detektory te dostępne są w wersji otwartej i z błonką umieszczoną w pojemniku z filtrem. [1]



Rys. 5.1 Detektory śladów cząstek alfa [1]

Obecnie dostępne detektory tego typu dają odczyty o bardzo wysokiej precyzji nawet, gdy zawartość radonu jest tak niska, jak 10 Bq/m^3 . Najlepszy model tego typu detektora przy okresie pomiarowym wynoszącym 3 miesiące może dać wynik z dokładnością do 10% przy zawartości radonu 50 Bq/m^3 . [1]

Detektory z węglem drzewnym składają się z węgla drzewnego umieszczonego w plastikowym pojemniku. Istnieją dwie zasadniczo różne wersje tego detektora – jedna wyłącznie z węglem drzewnym w pojemniku, druga oprócz węgla drzewnego zawiera dodatkowo tabletkę TLD. Gdy pojemnik jest otwarty, radon jest adsorbowany przez węgiel. Zaadsorbowana ilość radonu jest proporcjonalna do zawartości radonu w powietrzu w pokoju. Pomiar zostaje zakończony zaplombowaniem wieczka pojemnika. W przypadku detektora zawierającego jedynie węgiel zawartość radonu w pomieszczeniu, w którym wykonane zostały pomiary, oceniany jest na podstawie pomiaru promieniowania gamma z produktów rozpadu radonu. Detektor ten „pamięta” więc zawartość radonu jedynie przez 2-3 dni od rozpoczęcia pomiaru. [1]

Z uwagi na fakt, iż czas pomiaru jest tak krótki detektory te nie mogą być wykorzystywane do oszacowania średniej rocznej zawartości radonu w pomieszczeniach, w których stężenie radonu jest zmienne. [1]

W przypadku detektora z TLD, detektor TL jest wystawiony na działanie promieniowania pochodzącego z rozpadających się produktów rozpadu radonu zaadsorbowanego przez węgiel. Część energii promieniowania zgromadzona jest w detektorze. Zawartość radonu w powietrzu można więc określić na podstawie pomiaru ilości zmagazynowanej energii. Detektory tego typu można wykorzystywać przy okresach pomiarowych od 1 tygodnia do 1 miesiąca. [1]



Rys. 5.2 Detektory zawierające węgiel aktywny oraz węgiel aktywny i TLD (po prawej) [1]

Urządzenia TLD składają się z komory pomiarowej, w której radon ulega rozpadowi. Powstałe wówczas produkty rozpadu są przyciągane przez pole elektryczne do dozymetru termoluminescencyjnego. Energia z produktów rozpadu radonu jest gromadzona w dozymetrze w czasie pomiaru. Następnie dozymetr TL zostaje „odczytany” w specjalnym przyrządzie laboratoryjnym. [1]

Mierniki do ciągłych i skomasowanych pomiarów radonu można podzielić na trzy podstawowe typy:

Pulsacyjna komora jonizacji – w celu wykonania pomiaru, powietrze wpompowywane jest do komory jonizacyjnej przez filtr, który usuwa produkty rozpadu radonu. Rozpad alfa zachodzący w komorze powoduje uwalnianie ładunków elektrycznych, które są gromadzone na elektrodach komory z polem elektrycznym. Impulsy elektryczne są wzmacniane i analizowane przez mikroprocesor. [1]

Komora pomiarowa z detektorem półprzewodnikowym – powietrze z pokoju dyfunduje do komory pomiarowej poprzez filtr, który zatrzymuje produkty rozpadu radonu. Gdy radon ulega rozpadowi w komorze, powstają produkty jego rozpadu. Cząstki alfa emitujące w czasie rozpadu są rejestrowane przez detektor półprzewodnikowy. [1]

Komora Lucasa - w celu wykonania pomiaru, powietrze wpompowywane jest do komory pomiarowej przez filtr, który usuwa produkty rozpadu radonu. Emitowane w czasie rozpadu cząstki alfa w momencie zderzenia się ze ściankami komory pokrytymi siarczkiem cynku wywołują efekty świetlne. Komora pomiarowa połączona jest oknem z fotomultiplikatorem, który przekształca efekty świetlne w mierzalne impulsy elektryczne. Są one następnie rejestrowane przez licznik. [1]

Miernik z filtrem do pomiarów skomasowanych przepompowuje powietrze przez filtr, na którym gromadzą się produkty rozpadu radonu. Zawartość produktów rozpadu radonu jest określana na podstawie pomiaru emitowanych przez nie cząstek alfa. [1]

Miernik z ciągłym zapisem produktów rozpadu radonu działa w zasadzie tak samo, jak miernik do pomiarów skomasowanych. Powietrze ze znaną wydajnością wpompowywane jest przez filtr. Detektor cząstek alfa umieszczony jest w taki sposób, że możliwy jest ciągły pomiar ilości emitowanych z filtru cząstek alfa. Miernik podaje więc sumaryczną zawartość produktów rozpadu radonu z okresu o dowolnej długości czasu trwania, a także wartość średnią od początku okresu pomiarowego. [1]

Miernik typu E-Perm do skomasowanych pomiarów radonu, bazujący na elektrecie. Przyrząd pomiarowy składa się z komory pomiarowej, na której dnie umieszczony jest elektret (patrz rys. 5.3). Elektret składa się z krążka p.t.f.e., który naładowany jest do 700 V. Pomiar rozpoczyna się w momencie, gdy komora zostaje otwarta i gaz do niej dyfunduje. Odbywa się to przez filtr, który zatrzymuje produkty rozpadu radonu. Gdy radon ulega rozpadowi, wówczas powietrze w komorze jest jonizowane i powstałe jony ujemne są przyciągane przez elektret. Każdy z elektronów powoduje niewielki spadek napięcia na elektrecie. Pomiar kończy się w chwili zamknięcia komory. Za pomocą specjalnego voltomierza mierzy się napięcie na elektrecie przed i po okresie pomiarowym, a różnica tych napięć jest proporcjonalna do zawartości radonu w pomieszczeniu. [1]



Rys. 5.3 Miernik typu E-Perm z elektretem [1]

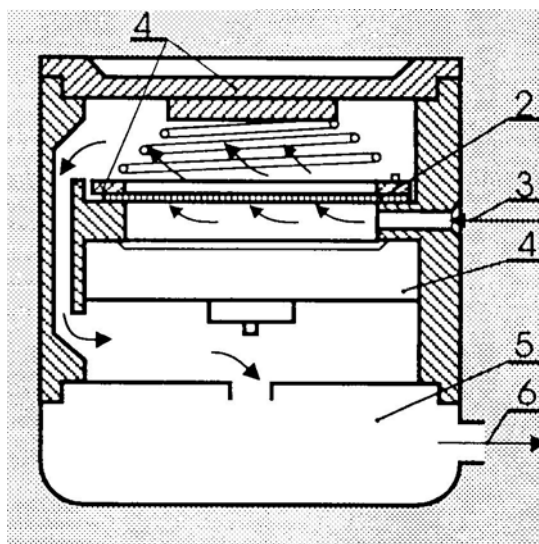
Tabela 5.1 Podsumowanie i porównanie metod pomiarowych zawartości radonu w powietrzu. [1]

Typ	Pomiar	Czas pomiaru	Szacowany błąd pomiaru stężenia gazu radonowego dla różnych zakresów pomiarowych
-----	--------	--------------	--

			zakres w Bq/m³	błąd w ±%
<i>Detektor cząstek alfa otwarty</i>	<i>Rn + prod.</i>	<i>> 2 miesiące</i>	100-400	20-30
	<i>rozp.</i>		>800	20
<i>Detektor cząstek alfa z filtrem</i>	<i>Rn</i>	<i>> 2 miesiące</i>	200	5-15
			>800	5-10
<i>Detektor węglowy bez TLD</i>	<i>Rn</i>	<i>2-3 dni</i>	100-400	5-10
			>800	10
<i>Detektor węglowy z TLD</i>	<i>Rn</i>	<i>1-4 tygodnie</i>	100-400	10-20
			>800	10
<i>Urządzenie TLD</i>	<i>Rn</i>	<i>1-4 tygodnie</i>	50-150	10-20
			>400	10
<i>Miernik do skomasowanych pomiarów na filtrze</i>	<i>Rn + prod. rozp.</i>			
<i>Miernik do ciągłych pomiarów na filtrze</i>	<i>Rn + prod. rozp.</i>	<i>48h</i>	20-150	5-15
			>150	5-15
<i>Miernik do skomasowanych pomiarów radonu</i>	<i>Rn</i>			
<i>Miernik do ciągłego pomiaru radonu</i>	<i>Rn</i>	<i>48h</i>	20-150	5-15
			>400	5-10
<i>Miernik z elektretem</i>	<i>Rn</i>	<i>1-4 tygodnie</i>	40-400	5-15
			>800	5-10

Jak już wspomniano w punkcie 4, na problem związany z koncentracją radonu w powietrzu zwrócono najpierw uwagę w kopalniach, których pracownicy bardzo często zapadali na raka płuc. Do szybkiego i bezpośredniego pomiaru wartości energii potencjalnej alfa oraz stężenia produktów rozpadu radonu-222 w powietrzu podziemnych kopalń służy urządzenie zwane **radiometrem górniczym**. [2]

Działanie radiometru (rys. 5.4, 5.5) polega na tym, że próbka powietrza o objętości 10l jest pobierana przez pompkę membranową umieszczoną w głowicy pomiarowej. Zasysane powietrze przechodzi przez filtr z włókniny szklanej, na którym osadzają się aerozole promieniotwórcze. Promieniowanie alfa jest rejestrowane przez detektor półprzewodnikowy, umieszczony w niewielkiej odległości od filtra. [2]



Rys. 5.4 Przekrój głowicy pomiarowej:

- 1 – wymienny uchwyt filtra
- 2 – filtr
- 3 – wlot powietrza
- 4 – detektor krzemowy
- 5 – pompka membranowa
- 6 – wylot przefiltrowanego powietrza [2]

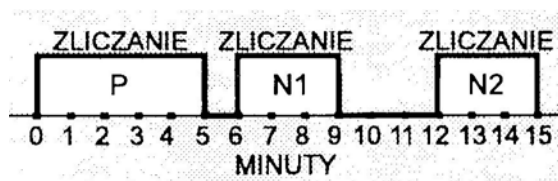


Rys. 5.5 Radiometr górniczy typ RGR-20 [3]

Pomiar energii potencjalnej promieniowania alfa lub stężenia poszczególnych produktów rozpadu radonu odbywa się wg metody Markowa. Wybór tej metody był podyktowany tym, że została ona uznana za optymalną dla przeciętnego poziomu stężenia ^{222}Rn , występującego w kopalniach rud metali i węgla. Dla tej metody opracowano program, który jest realizowany przez mikrokomputer. Po adaptacji tego programu można będzie przeprowadzać pomiary także wg innych metod opisywanych w literaturze. [2]

Cykl Markowa (rys. 5.6) trwa 15 minut. W czasie pierwszych 5 minut odbywa się pobór powietrza z wydajnością 2 l/min. Wartość przepływu jest kontrolowana na rotametrze. Po minucie przerwy następuje zliczanie impulsów z detektora w czasie 3 minut (N1) – od 6 do 9 minuty cyklu.

Ilość zliczeń N2 mierzy się również w czasie 3 minut, ale pomiędzy 12 a 15 minutą cyklu pomiarowego. Mikrokomputer automatycznie przetwarza wartości N1 i N2 na energię potencjalną alfa oraz stężenia produktów rozpadu (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi i ^{214}Po). [2]



Rys. 5.6 Cykl pomiarowy wg metody Markowa

Głowica radiometru współdziała ze wzmacniaczem oraz dyskryminatorem, tworząc tzw. tor radiometryczny. Impulsy z detektora promieniowania są wzmacniane i po dyskryminacji zliczane w liczniku mikrokomputera. [2]

Wszystkie funkcje realizowane w radietrze są sterowane programem lub wykonywane przez program sterujący. Z punktu widzenia użytkownika program realizuje następujące funkcje:

- ✓ sterowanie procesem pomiarowym,
- ✓ transmisję wyników pomiarów do urządzenia zewnętrznego,
- ✓ kontrolę toru pomiarowego,
- ✓ ustawienie bieżącej daty i czasu. [2]

Literatura:

1. Bertil Clavensjö, Gustav Åkerblom „The Radon Book. Measures against Radon”, The Swedish Council for Building Research, Ljunglöfs Offset AB, Stockholm 1994
2. J. Gierdalski, J. Bartczak, P. Urbański „Radiometr górniczy do pomiarów chwilowych stężeń produktów rozpadu radonu w powietrzu”, PTJ, Vol 36, Z.3-4, Warszawa 1993
3. Nukleonika 38, No. 4 1993

6 Radon w powietrzu wewnętrznym

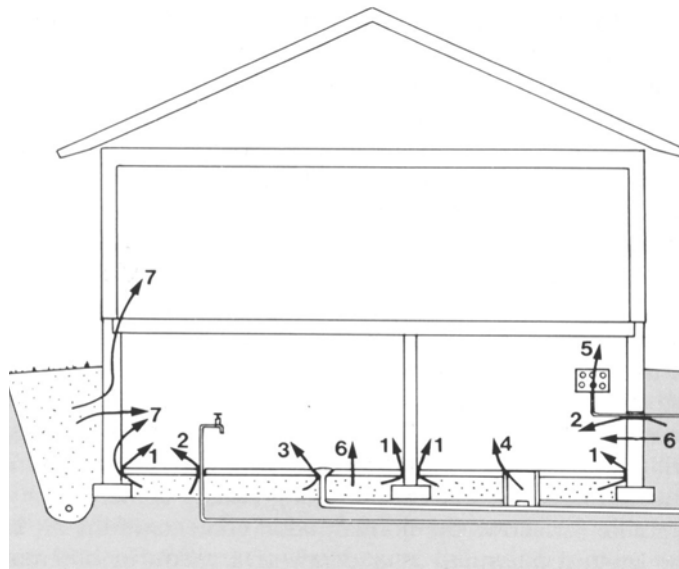
6.1 źródła

W latach 70-tych stwierdzono wysokie stężenie radonu w budynkach w Szwecji i Finlandii. Stężenia te były 5000 razy większe aniżeli stężenia radonu w powietrzu zewnętrznym. Później stwierdzono w budynkach na terenie Anglii i USA stężenia radonu przewyższające 500-krotnie wartości określone dla powietrza zewnętrznego. Zwykle najważniejszym źródłem radonu w pomieszczeniach jest grunt, na którym stoi budynek, a następnie materiały budowlane, atmosfera zewnętrzna, używana woda i gaz naturalny. Powodem wysokich stężeń radonu w badanych domach była najczęściej ziemia. Stwierdzono, że w niektórych przypadkach domy zostały posadowione na starych hałdach przedsiębiorstw górniczych (USA) lub na terenie gdzie składowano uprzednio odpady z przeróbki łupków ilastych (Szwecja), odpady po ekstrakcji radu (Australia) lub na terenach odzyskanych po wydobyciu rud fosforanowych (USA). [1]

Wnikanie radonu z ziemi do budynków zależy od sposobu usadowienia go na gruncie (podpiwniczenie), konstrukcji, systemu wentylacji, liczby pęknięć, szczelin i mikroszczelin w podłogach oraz ścianach. [1]

Radon z gruntu przedostaje się do budynku wraz z powietrzem zasysanym z gleby przez szczeliny w fundamentach. Siłą wywołującą to zjawisko jest niewielkie podciśnienie wywoływane wewnątrz budynku przez system wentylacyjny. Większość domków jednorodzinnych posiada system wentylacji naturalnej, w którym przepływ powietrza powodowany jest przez różnicę temperatur na zewnątrz i wewnątrz budynku. Wówczas jeżeli budynek posadowiony jest na gruncie przepuszczalnym dla powietrza, duże ilości radonu będą zasysane do wnętrza zwłaszcza w zimne dni. W przypadku wentylacji mechanicznej zasysana ilość radonu jest stała. [2,3]

Radon może również dyfundować przez fundamenty do budynku. Dyfuzja ma jednak bardzo niewielki wpływ na zawartość radonu w powietrzu wewnętrznym, jedynie przy bardzo wysokich stężeniach gazu w gruncie – powyżej $500\ 000\ \text{Bq/m}^3$ – może ona odgrywać jakąkolwiek rolę. [2]



Rys. 6.1 Miejsca w fundamentach budynków, przez które radon przedostaje się do wnętrza [2]

1. Przerwy pomiędzy płytą podłogi, a ścianą, które powstają gdy podłoga zostaje wylana pod zbudowaniu ścian. Przerwy te mogą być trudne do zauważenia wizualnie.
2. Otwory w podłodze na przewody kanalizacyjne, wody pitnej, itp., także w powłokach ochronnych.
3. Otwory na spusty denne.
4. Studzienki rewizyjne do czyszczenia przewodów kanalizacyjnych.
5. Przejścia przez ścianę kabli elektrycznych lub telefonicznych.
6. Pęknięcia w ścianach lub podłodze spowodowane osiadaniem budynku, kurczeniem/rozkurczaniem itp.
7. Ścieżki przepływu przez materiały budowlane przepuszczalne dla powietrza (pustaki, lekkie beton itp.), łączenia ścian.

Materiały budowlane stanowią obecnie drugie co do wielkości źródło radonu w powietrzu wewnętrznym (kiedyś nawet uznawano je za główne źródło R_n – UNSCEAR 1977). Praktycznie wszystkie materiały budowlane na bazie naturalnego kamienia zawierają uran, ponieważ jest to

pierwiastek bardzo rozpowszechniony w litosferze. Mimo iż zwykle ilość emitowanego radonu z materiałów budowlanych nie jest zastraszająco duża, to na przykład lekki beton produkowany w Szwecji w latach 1929 - 1975 z łupków ilastych bogatych w uran jest tam dużym problemem, gdyż typowa emisja z niego wynosi 50-200 Bq/m²h, co przyczynia się do znacznego wzrostu zawartości radonu w powietrzu wewnętrznym. [2,3,4]

W pewnym momencie produkcji materiałów budowlanych stosowano wiele surowców tanich lub produktów odpadowych, które zawierały substancje promieniotwórcze. I tak np. w produkcji betonów stosowano łupki ilaste, szlakę wapnio-krzemową, popioły dymnicowe. Do produkcji lekkich bloków i suchych tynków stosowano fosfogips. Zużywano również domieszki odpadów przemysłowych z przemysłów nienuklearnych takich, jak np. elektrownie węglowe, huty, zakłady chemiczne itp. w odpadach, z których występują naturalne radionuklidy. Podwyższona zawartość źródeł radonu występuje również w ceglach z żużlem z rudy żelaza o podwyższonej zawartości uranu. Wprowadzenie odpadów do materiałów budowlanych miało być sposobem na chociaż częściowe rozwiązanie problemu deponowania ich, a także zmniejszyć koszt samych materiałów, które potrzebne są w bardzo dużych ilościach. Jednakże ze względu na ich właściwości promieniotwórcze konieczne było wprowadzenie regulacji mówiących o tym, jaki procent odpadów można zawrzeć w poszczególnych typach materiałów, ustalenie klas materiałów informujących o tym, do jakiego celu mogą być one wykorzystywane (do budowy konstrukcji nośnych, wykończenia wnętrz itp.) a także kontrola. [1,2,5]

Średnie stężenia prekursorów radonu w niektórych materiałach budowlanych zestawiono w tabeli 6.1:

Tabela 6.1 Średnie stężenia ²²⁶Ra i ²³²Th lub ²³⁸Th w niektórych materiałach budowlanych stosowanych w różnych krajach [6]

<i>Kraj</i>	<i>Materiał</i>	<i>Stężenie średnie [Bq/kg]</i>	
		²²⁶ Ra	²³² Th lub ²³⁸ Th
Niemcy	<i>gips</i>	<19	<11
	<i>cegła czerwona</i>	281	233
	<i>cement</i>	<26	<19
Wielka Brytania	<i>gips</i>	22	7
	<i>cegła czerwona</i>	52	44
	<i>cement</i>	22	18
Polska	<i>gips</i>	26 – 740	11 – 44
	<i>cegła czerwona</i>	19 – 22	22 – 44
	<i>cement</i>	7,7 – 12,6	11 – 67

Ilość radonu przedostającego się do wnętrza budynku, zależy nie tylko od zawartości w nich materiałów promieniotwórczych, ale również m.in. od porowatości i gęstości materiału i sposobu wykończenia ścian. [3]

Okazuje się jednak, że największe stężenia Rn, a co za tym idzie także aktywności, zanotowano w budynkach drewnianych, głównie parterowych na lekkich fundamentach, mimo że drewno wykazuje niższą aktywność niż mur czy beton. [6]

Szczegółowe badania przeprowadzone w Polsce wykazały, że średnie roczne wartości stężeń Rn w powietrzu w naszych mieszkaniach są dość zróżnicowane i wynoszą dla mieszkań:

- ✓ murowanych 50,7 Bq/m³
- ✓ betonowych 27,4 Bq/m³
- ✓ drewnianych 60,7 Bq/m³ [6]

Innym źródłem radonu w pomieszczeniach mieszkalnych jest gaz ziemny. Pod ziemią radon przechodzi do gazu, a jego stężenie spada w wyniku wstępnej obróbki i przechowywania gazu. Stężenie radonu w gazie naturalnym może się wahać od stężeń trudno wykrywalnych do 50 Bq/m³. Przy zaopatrzeniu mieszkań w wyciągi spalin zwiększenie zawartości radonu w pomieszczeniach ze spalonego gazu jest nieznaczne. [1]

Kolejnym źródłem radonu w pomieszczeniach mieszkalnych jest woda. Jednakże nawet znaczne stężenie radonu w wodzie pitnej nie stanowi poważniejszego zagrożenia, gdy woda jest spożywana po przegotowaniu lub w gotowanych potrawach. Gotowanie wody usuwa radon w znacznym stopniu. W określonych warunkach niewielkim zagrożeniem może być inhalacja radonu uwolnionego z wody, co może mieć miejsce w łazience, gdy otwarty jest ciepły prysznic. [1]

Powietrze zewnętrzne, ze względu na małą zawartość w nim radonu (szacowaną kilka lat temu w USA na 4-15 Bq/m³, a obecnie na kilkadziesiąt Bq/m³), stanowi zwykle czynnik rozcieńczający. Jednakże w przypadku mieszkań na wysokich kondygnacjach, zbudowanych z materiałów od niskiej zawartości uranu, może ono stanowić źródło tego pierwiastka w środowisku wewnętrznym [3].

Źródła ekspozycji na radon w pomieszczeniach można więc uszeregować w następującej kolejności: grunt, materiały budowlane, powietrze zewnętrzne, woda i gaz. [1]

Stężenie ²²²Rn w mieszkaniach w niektórych krajach przedstawione jest w tabeli 6.2.

Tabela 6.2 Równoważne stężenia ²²²Rn w równowadze z produktami pochodnymi w mieszkaniach w niektórych krajach [1]

<i>Kraj</i>	<i>Równoważne stężenia Rn w równowadze* z produktami pochodnymi [Bq/m³]</i>
<i>Austria (średnia dla Salzburga)</i>	12,0
<i>Dania</i>	4,8
<i>Finlandia (poza niską kondygnacją)</i>	17,0
<i>dawne RFN</i>	8,1

Norwegia (średnia)	26,0
Szwecja (średnia)	60,0
Anglia (domki rodzinne)	15,0
USA (New Jersey i New York)	15,0
dawne ZSRR (domki rodzinne)	16,0

*współczynnik równowagi = 0,5

Literatura:

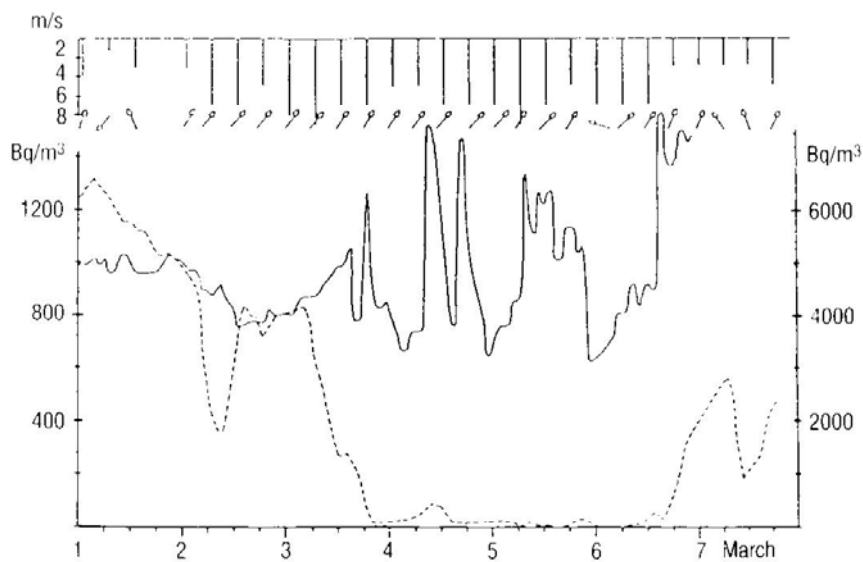
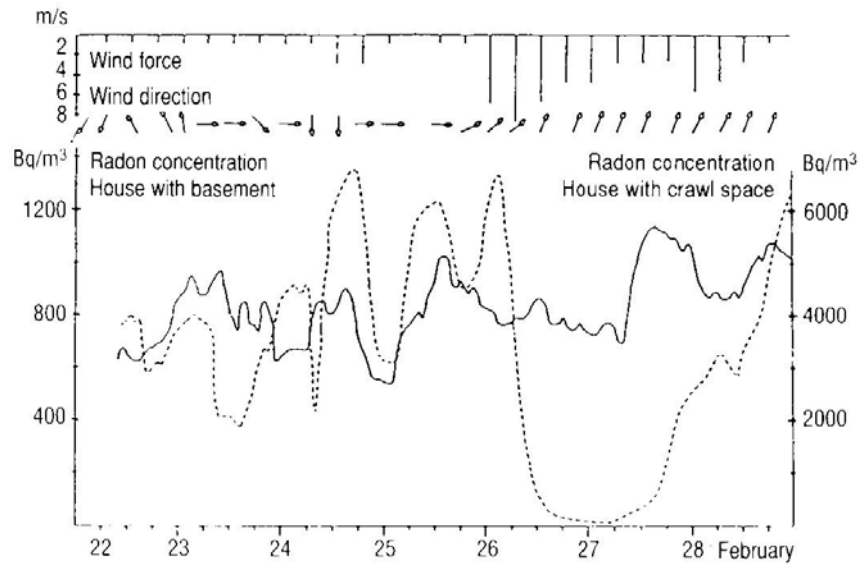
1. Z. Szot „RAD I RADON w środowisku oraz skutki ich wniknięcia do organizmu człowieka”, Postępy Techniki Jądrowej, Vol. 36, Z. 1-2, Warszawa 1993
2. Bertil Clavensjö, Gustav Åkerblom „The Radon Book. Measures against Radon”, The Swedish Council for Building Research, Ljunglöfs Offset AB, Stockholm 1994
3. F. Bochicchio, J.P. McLaughling, S. Piermattei “Radon in the air”, European Commission, Directorate-General for Science and Development Joint Research Centre-Environment Institute, Report EUR 16123 EN, Luxemburg 1995
4. G.B. Leslie, F.W. Lunau „Indoor air pollution. Problems and priorities”, Cambridge University Press, Cambridge 1992
5. E. Botezau, O. Iacomb, C. Grecea, C. Miron, L. Clain, M. Gradinaru “Radiological consequences of industrial wastes used as building material”, Indoor Air 1999, Official Conference of The International Academy of The Indoor Air Sciences, Edinburg, 1999
6. A. Skłodowska, B. Gostkowska “Promieniowanie jonizujące a człowiek i środowisko”, Wydawnictwo Naukowe SCHOLAR, Warszawa 1994

6.2 od czego zależy stężenie radonu w pomieszczeniach [na podst. 1]

Zawartość radonu w pomieszczeniach zmienia się zarówno w ciągu dnia, jak i z dnia na dzień. Zmienność często jest bardzo duża, a spowodowane jest to wieloma czynnikami, które warto pokrótce omówić:

- ✓ **zmienność stopnia wentylacji** spowodowana sposobem użytkowania mieszkania przez mieszkańców. Gdy mieszkańcy opuszczają dom zamykają oni na ogół okna, pomieszczenia są więc zamknięte, a co za tym idzie poziom wymiany powietrza jest niski i wraź zawartość radonu w powietrzu wewnętrznym. Rano oraz w okresie popołudniowo-wieczornym aktywność mieszkańców jest znacznie większa – otwierają oni i zamykają okna i drzwi, zwiększając tym samym stopień wymiany powietrza i zmniejszając zawartość radonu w pomieszczeniach. Z tego też powodu roczna średnia wartość stężenia radonu w mieszkaniach zależy od sposobu ich użytkowania;
- ✓ **rozmieszczenie** – jeżeli drzwi pokoju, do którego z podłoża przedostaje się radon są zamknięte oraz relatywnie szczelne, wówczas stężenie radonu po przeciwnej stronie mieszkania będzie niższe, niż w przypadku gdy drzwi te są otwarte;

- ✓ **wpływ wiatru** – w nieszczelnym budynku zlokalizowanym na odsłoniętym terenie zmienność stopnia wymiany powietrza wewnętrznego będzie bardzo zależna od kierunku i prędkości wiatru (rys. 6.2);
- ✓ **różnica temperatur** – temperatura wewnętrzna jest w miarę stała, podczas gdy zewnętrzna może się zmieniać o kilka stopni w ciągu dnia. Różnica temperatur wewnątrz i na zewnątrz wywołuje siłę napędową określaną jako ciąg kominowy, która warunkuje działanie wentylacji naturalnej;
- ✓ **system wentylacji** – w budynkach z wentylacją mechaniczną działającą ciągle ze stałą wydajnością stopień wymiany powietrza jest bardziej stały niż w mieszkaniach z wentylacją naturalną (rys. 6.2), a co za tym idzie zawartość radonu w powietrzu utrzymywana jest na stałym poziomie w przypadku mieszkań z wentylacją mechaniczną.



———— House with basement. Radon content measured in a basement room.

..... House with crawl space. Radon content measured in a dwelling room.

Rys. 6.2 Zmienność stężenia radonu w dwóch domkach jednorodzinnych o różnej konstrukcji z wentylacją naturalną. Czas pomiarów – od 22 lutego do 7 marca. Źródło: The Council fo Building Research, R28:1982 [x]

Literatura:

1. Bertil Clavensjö, Gustaw Åkerblom „The Radon Book. Measures against Radon”, The Swedish Council for Building Research, Ljunglöfs Offset AB, Stockholm 1994

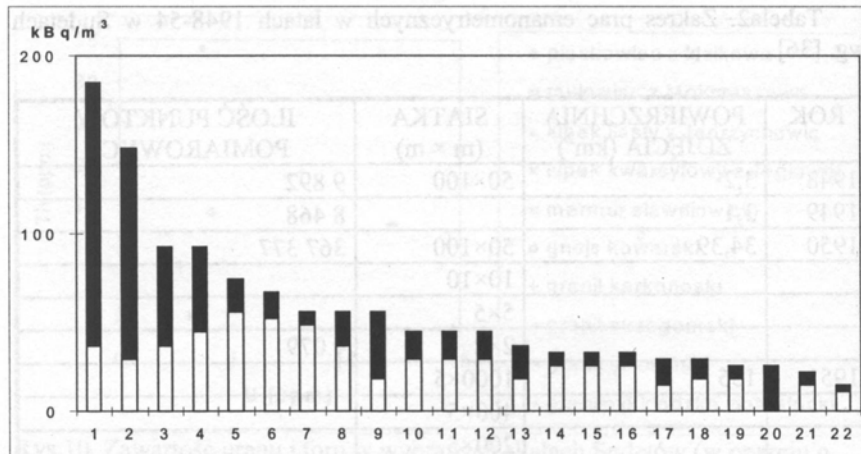
6.3 radon w powietrzu – jak wygląda sytuacja w różnych krajach

6.3.1 Polska

Stężenie radonu na wysokości 1 m nad powierzchnią ziemi na terenie Polski wynosi od 0,7 do 12,6 Bq/m³ i zmienia się do kilku razy w zależności od pogody, pory roku i in. [1]

Obszarem o najwyższej koncentracji pierwiastków promieniotwórczych jest południowo zachodnia Polska. Wynika to z budowy geologicznej Sudetów, gdzie na znacznych obszarach odsłaniają się kwaśne skały magmowe oraz skały osadowe powstałe z ich wietrzenia. [2]

W wyniku prac emanometrycznych określono regionalne i lokalne tło zawartości radonu w powietrzu glebowym (rys. 6.3). Wartości określone w opracowaniach archiwalnych jako tło, w przypadku mniejszych obszarów położonych wokół mineralizacji uranowych, mogą osiągać wartości do ponad 180 kBq/m³ jak to ma miejsce w przypadku Jaszkowej Górnej, położonej na terenie kłodzko-złotostockiego masywu granitoidowego. Wartości tła dla większych obszarów są znacznie mniejsze. Regionem o najwyższej wartości tła jest masyw granitowy Karkonoszy, gdzie waha się ono od 37 do 92 kBq/m³. W Górach Izerskich, na obszarze zbudowanym z granitognejsów, przeciętne koncentracje radonu w glebie wahają się w przedziale 29-44 kBq/m³. znacznie niższe wartości tła 18,6-26,6 kBq/m³ stwierdzono w Górach Kaczawskich, gdzie dominują słabo zmetamorfizowane skały osadowe i wulkaniczne. Najniższe wartości tła (11,1-14,8 kBq/m³) stwierdzono na obszarach zbudowanych z wapieni krystalicznych rejonu Kłodzka. [2]

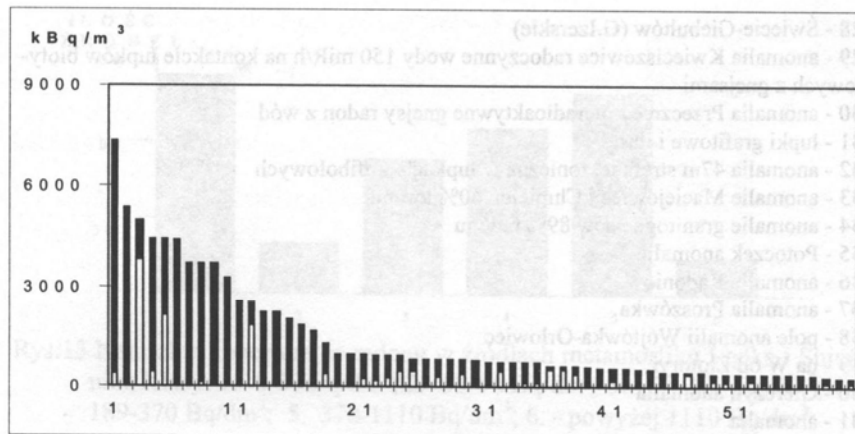


Rys.11. Przeciętne zawartości radonu w powietrzu glebowym w Sudetach (w oparciu o dane archiwalne ZPR-1[53])

- 1 - tło wokół mineralizacji U Jaskowa Grn. (masyw granitoidowy kłodzko złotostocki)
- 2 - rejon mineralizacji U Jaskowa Grn. (masyw granitoidowy kłodzko złotostocki)
- 3 - masyw granitowy Karkonoszy - średnio
- 4 - rejon złoża uranu Kopaniec (G.Izerskie)
- 5 - granitognejsy izerskie pomiędzy pasmami łupków łyszczykowych
- 6 - masyw granitowy Strzegomia
- 7 - rejon Proszówki (G.Izerskie)
- 8 - Góry Izerskie - średnio
- 9 - granity i inne skały magmowe Ziemi Kłodzkiej
- 10 - granitognejsy izerskie - średnio
- 11 - rejon Czerniawy-Zdrój (G.Izerskie)
- 12 - Góry Izerskie na N od pasm łupkowych
- 13 - rejon Opolna
- 14 - rejon Starej Kamienicy (G.Izerskie)
- 15 - rejon Leśnej (G.Izerskie)
- 16 - gnejsy łyszczykowe Ziemi Kłodzkiej
- 17 - rejon Zgorzelca
- 18 - rejon Głuchołaz
- 19 - Góry Kaczawskie - średnio
- 20 - łupki łyszczykowe centralnej części G. Izerskich
- 21 - łupki łyszczykowe Ziemi Kłodzkiej
- 22 - wapień krystaliczne Ziemi Kłodzkiej

Rys. 6.3 [2]

Wybranie najwyższe wartości uznane za anomalne przedstawiono na rysunku 12 (Rys. 6.4). Maksymalne wartości anomalii stwierdzono w rejonie Przecznic, gdzie przekraczają one 7000 kBq/m³. Najniższe wartości uznane za anomalie stwierdzono w rejonie Głuchołaz, charakteryzującym się ogólnie niskim tłem. Uznane w tym wypadku za anomalne wartości mieszczą się w przedziale poniżej 118 kBq/m³ i są niewiele niższe od regionalnego tła granitu Karkonoszy, a wyraźnie niższe od lokalnego tła rejonu Jaskowej Grn. Należy podkreślić, że maksymalne stwierdzone anomalie przekraczają setki razy przeciętne koncentracje radonu w powietrzu glebowym, a w stosunku do powietrza atmosferycznego są to wartości setki tysięcy razy większe. [2]



Rys.12. Anomalne zawartości radonu w powietrzu glebowym w Sudetach (w oparciu o dane archiwalne ZPR-1[53])

- 1 - Pobiedna (G.Izerskie)
- 2 - Muchów paleoporfiry (G.Kaczawskie)
- 3 - Rzeszówek łupki (G.Kaczawskie)
- 4 - Kopaliny łupki (metamorfik Łądka i Śnieżnika)
- 5 - łupki amfibolowe (G.Izerskie)
- 6 - Wojcieszyce (N kontakt granitu Karkonoszy)
- 7 - strefy rudne (G.Kaczawskie)
- 8 - strefy rudne (G.Kaczawskie)
- 9 - Gierczyn szybik (G.Izerskie)
- 10 - Radoniów złożo (G.Izerskie)
- 11 - strefy anomalne w niecce północnosudeckiej
- 12 - Świecie-Giebułtów (G.Izerskie)
- 13 - strefa tektoniczna w łupkach (G.Izerskie)
- 14 - Lutynia łupki grafitowe (metamorfik Łądka i Śnieżnika)
- 15 - Proszowa łupki amfibolowe (G.Izerskie)
- 16 - Wałbrzych warstwy żaclerskie
- 17 - anomalia toronowa (G.Izerskie)
- 18 - G.Młyńsko (metamorfik Łądka i Śnieżnika)
- 19 - Kromnów strefa tektoniczna w łupkach (G.Izerskie)
- 20 - łupki amfibolowe (G.Izerskie)
- 21 - łupki łyszczykowe i chlorytowe (G.Izerskie)
- 22 - Leszczyna cechsztyń (G.Kaczawskie)
- 23 - Opolno szczeliny z gliną tektoniczną (G.Izerskie)
- 24 - Łądek Zdrój łupki grafitowe (metamorfik Łądka i Śnieżnika)
- 25 - Orłowiec gnejsy leukokratyczne (metamorfik Łądka i Śnieżnika)
- 26 - dajki z ortytem (G.Bystrzyckie)
- 27 - Świecie strefa tektoniczna (G.Izerskie)

-
- 28 - Świecie-Giebułtów (G.Izerskie)
 - 29 - anomalia Kwieciszowice radoczynne wody 150 miR/h na kontakcie łupków biotytowych z gnejsami
 - 30 - anomalia Przeczniczy nieradioaktywne gnejsy radon z wód
 - 31 - łupki grafitowe i ilaste
 - 32 - anomalia 47m strefa tektoniczna w łupkach amfibolowych
 - 33 - anomalie Maciejowiec i Chmielęń 60% toronu
 - 34 - anomalie granitognejsów 89% radonu
 - 35 - Potoczek anomalie
 - 36 - anomalie Radoniów
 - 37 - anomalia Proszówka
 - 38 - pole anomalii Wójtówka-Orłowiec
 - 39 - na W od Złotoryi
 - 40 - Gierczyn anomalia
 - 41 - anomalia
 - 42 - Młynów kontakt tektoniczny gnejsów z łupkami
 - 43 - masyw granitoidowy kłodzko złotostocki okruszcowanie Jaskowej Górnjej
 - 44 - anomalia Radoniowa 1957
 - 45 - w pobliżu porfirów E od Wojcieszowa i N od Starej Góry pola do 100m średnicy
 - 46 - łupki hematytowe 2 km na E od Wojcieszowa
 - 47 - Lasówka anomalie wód
 - 48 - anomalia na E od Wlenia w brekcji zieleńcowej
 - 49 - anomalia N krańca wsi Krzewie Wielkie 40% toronu dł 750 m
 - 50 - anomalie nie związane z okruszcowaniem
 - 51 - uskoki sudecki brzeżny anomalie punktowe
 - 52 - W skraj Starych Rochowic w szarej glince w szczelinach czarnych łupków
 - 53 - obszar anomalii zbiotytowane granity i łupki łyszczykowe
 - 54 - anomalia Mirska dajka amfibolitowa dł 1km
 - 55 - Kamionki piaskowce
 - 56 - na N od Stronia skrzyżowanie dróg do Stojkowa strefa tektoniczna brekcji z glinką
 - 57 - Pieszycy na kontakcie porfirowatych granitów z gnejsami, toron?
 - 58 - anomalie na granicie (G.Izerskie)
 - 59 - anomalia (G.Kaczawskie)
 - 60 - anomalie 60% toronu (G.Izerskie)

Rys. 6.4 [2]

Badania przeprowadzone w 1996 r. przez CLOR wykazały, że średnie stężenie radonu w budynkach mieszkalnych w Polsce wynosi 50 Bq/m^3 (rozrzut od 13 do 99 Bq/m^3), a tylko w regionach: podgórskim – 75 Bq/m^3 oraz górnośląskim - 65 Bq/m^3 . Istnieją jednak obszary (woj. południowo-zachodnie), gdzie prawdopodobieństwo znalezienia mieszkań o stężeniach radonu ponad 200 Bq/m^3 jest rzędu kilku procent, natomiast mało prawdopodobne jest występowanie w Polsce budynków, w których stężenie radonu przekracza 800 Bq/m^3 . Radon nie stanowi więc w Polsce istotnego zagrożenia radiologicznego. [3,4]

W 7 polskich miastach (Warszawa, Łomża, Suwałki, Białystok, Gdańsk, Kraków, Jelenia Góra) wykonano łącznie w 345 mieszkaniach kwartalne pomiary radonu detektorami LR-115 dla czterech pór roku:

- I. seria – wiosna (od 1 kwietnia do 30 czerwca)
- II. seria – lato (od 1 lipca do 30 września)
- III. seria – jesień (od 1 października do 30 grudnia)
- IV. seria – zima (od 1 stycznia do 31 marca) [5]

Wyniki pogrupowano w trzech typach budownictwa:

- a) **murowane** – budynki z tradycyjnej cegły, kamienia, gliny i muru pruskiego;
- b) **betonowe** – budynki z betonów ciężkich i średnich, czyli wielka płyta, metoda wielkoblokowa, metoda monolityczna oraz domy z żużlobetonu, betonu, pustaków betonowych i żużlobetonowych, też budynki z betonów lekkich stanowiących wypełnienie w metodzie szkieletowej;
- c) **drewniane** – budynki drewniane lub takie, w których drewno było materiałem dominującym. [5]

Wnioski wypływające z przeprowadzonych badań są następujące:

- ✓ Najniższa średnia wartość odpowiada grupie budynków betonowych, a najwyższa drewnianych.
- ✓ Dla wszystkich trzech grup średnie zimowe i jesienne są wyższe niż letnie i wiosenne, co związane jest prawdopodobnie z intensywnością wietrzenia w ciepłych sezonach.
- ✓ Średnie stężenie radonu dla wszystkich mieszkań wyniosło 38 Bq/m^3 ; dla około 33% mieszkań wartość średnia jest wyższa, a dla 2% (czyli 8 mieszkań) odnotowano wartości przekraczające 200 Bq/m^3 .
- ✓ Największe wartości średnie dla wszystkich trzech grup budynków występują na terenie i w okolicy Jeleniej Góry. Na tym terenie też wystąpiła najwyższa zmierzona wartość – 570 Bq/m^3 w budynku murowanym. Najmniejsza – 4 Bq/m^3 została zmierzona w budynku betonowym w Warszawie.
- ✓ Przy współczynniku przebywania wewnątrz budynku wynoszącym 0,8 i współczynniku przeliczeniowym 0,061, wartość rocznego efektywnego równoważnika dawki dla statystycznego mieszkańca od promieniowania radonu i produktów jego rozpadu w czasie przebywania w budynku równa jest 1,41 mSv, co stanowi około 50% całkowitej rocznej ekspozycji od źródeł naturalnych równej 2,78 mSv/rok. [5]

Literatura:

1. M. Siemiński „Środowiskowe zagrożenia zdrowia”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001
2. A.T. Solecki „Geochemia Radonu”, XVII Szkoła Jesienna, Materiały Konferencyjne, Zakopane 22-26 września 1997
3. P. Jaracz „Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka”, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2001
4. L. Brunarski „Promieniowanie jonizujące – zagrożenie użytkowników pomieszczeń”, materiały konferencyjne „Problemy jakości powietrza wewnątrz w Polsce '98”, Warszawa 1998
5. K. Mamot-Ciesła, W. Rosińskie, J. Henszke, J. Jagielak „Pomiary stężeń radonu w budynkach i ocena narażenia ludności Polski”.

6.3.2 USA

Średnia aktywność Rn w pomieszczeniach wynosi w USA 37 Bq/m³ (Berger, 1990), ale w niektórych budynkach może osiągnąć 370 – 3700 Bq/m³. W 70 000 domów aktywność jest wyższa niż 800 Bq/m³. Oznacza to, że mieszkańcy tych domów pochłaniają dawkę równą tej, którą górnik w kopalni uranu pochłania w 4 miesiące pracy (jest to najdłuższy dopuszczalny czas zatrudnienia w ciągu roku). Skutkiem takiej sytuacji jest kilka tysięcy nowych przypadków raka rocznie. [1]

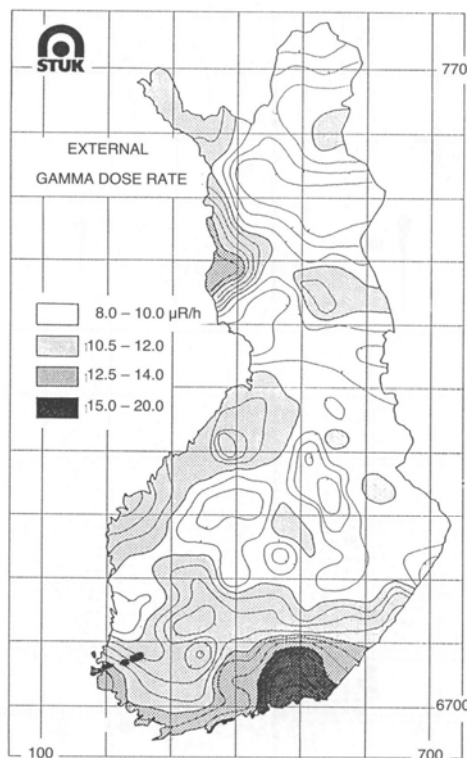
Mediana stężenia Rn na zewnątrz budynków w Nowym Jorku wynosi 6,7 Bq/m³, podczas gdy w piwnicach i na parterze wynosi 30 Bq/m³, co stanowi dowód większego zagrożenia wewnątrz budynków. [1]

Literatura:

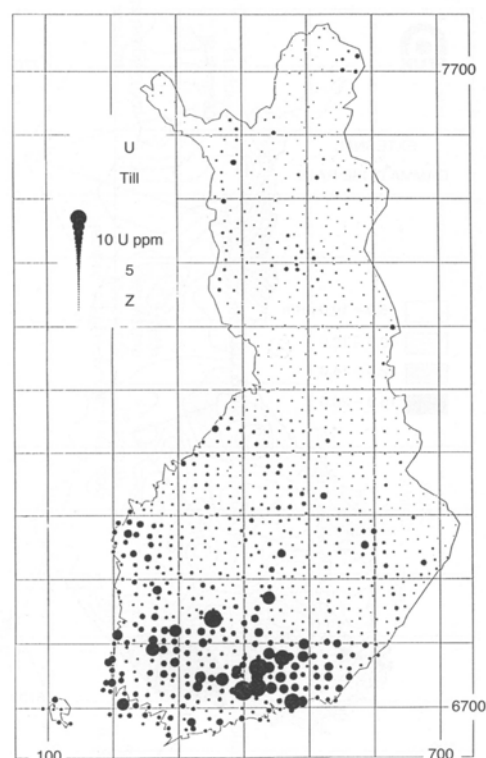
1. Bertil Clavensjö, Gustav Åkerblom „The Radon Book. Measures against Radon”, The Swedish Council for Building Research, Ljunglöfs Offset AB, Stockholm 1994

6.3.3 Finlandia

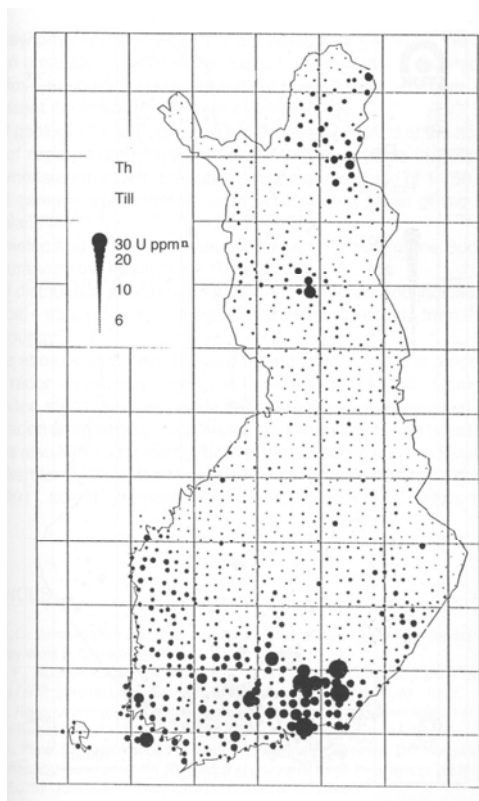
Poniżej zamieszczone mapy (rys. 6.5, 6.6, 6.7, 6.8), będące wynikiem badań przeprowadzonych przez P. Lahermo i R. Juntunen w 1991 r., obrazowo przedstawiają sytuację radonową na terenie Finlandii. Jak widać, największe koncentracje radonu w mieszkaniach występują przeważnie w południowej części kraju, oraz punktowo w miejscach występowania złóż toru. [1]



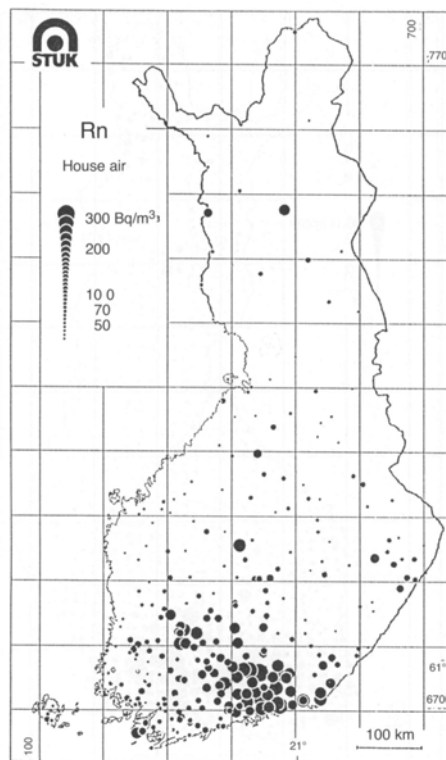
Rys. 6.5 Rozmieszczenie i intensywność źródeł promieniowania gamma [1]



Rys. 6.6 Zawartość uranu w glebie [1]



Rys. 6.7 Zawartość toru w glebie [1]



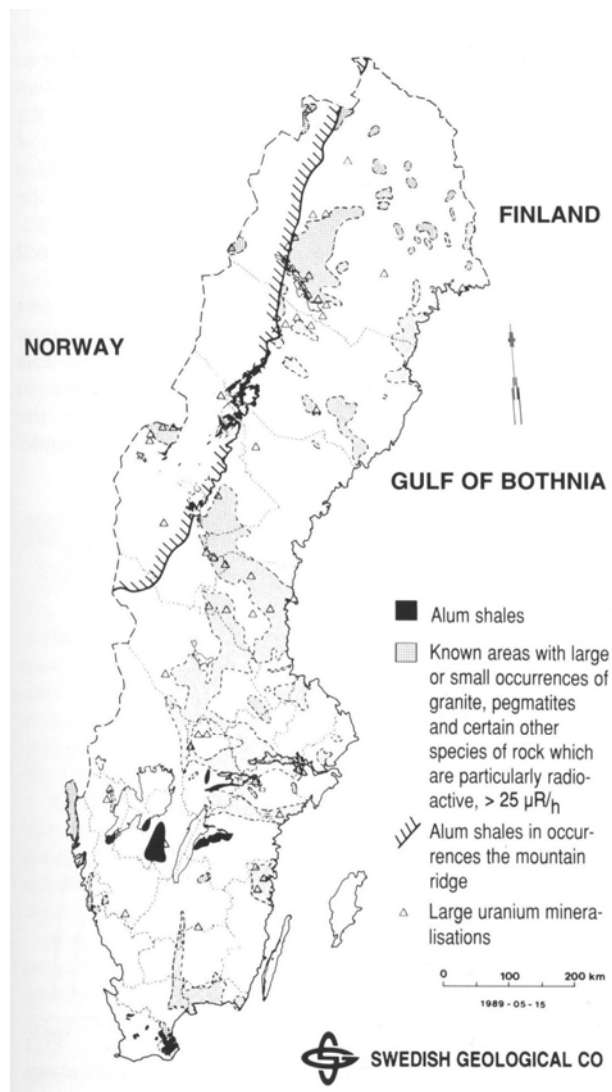
Rys. 6.8 Koncentracja radonu w powietrzu wewnętrznym [1]

Literatura:

1. J. Skowronek, K. Skubacz, S. Chałupnik, R. Kajdasz, S. Nalepa „A comparison of environmental and personal control of short-lived radon decay products in hard coal mines”, Nukleonika 38, No. 4, 1993

6.3.4 Szwecja

Szwecja zmaga się obecnie z poważnym problemem spowodowanym występowaniem gleb i skał uranonośnych, a także emanacją radonu z materiałów zawierających uran. Podłoże skalne Szwecji w znacznym stopniu składa się z granitów bogatych w uran i pegmatytów. Dlatego też wiele budynków na obszarach zurbanizowanych posadowionych zostało na skałach bogatych w uran i glebach o wysokiej przepuszczalności. [1]



Rys. 6.9 Rozmieszczenie bardzo bogatych w uran (rad) typów skał w Szwecji [1]

Okolo 300 000 budynków skonstruowanych zostało z użyciem materiałów zawierających uran – tzw. lekki beton. Materiał ten wykorzystany został zarówno do budowy ścian zewnętrznych, jak i wewnętrznych, a także podłóg. W domach tego typu stężenie radonu jest więc zawsze podwyższone. [1]

Oszacowano, że ludność Szwecji narażona jest na przyjęcie dwa razy większych dawek promieniowania radioaktywnego, niż pozostali mieszkańcy Ziemi. [1]

Literatura:

1. Bertil Clavensjö, Gustav Åkerblom „The Radon Book. Measures against Radon”, The Swedish Council for Building Research, Ljunglöfs Offset AB, Stockholm 1994

6.3.5 Wielka Brytania

W Wielkiej Brytanii dla 2309 mieszkań uzyskano średnie stężenie Rn 20 Bq/m^3 . Największe wartości równe 110 Bq/m^3 i 74 Bq/m^3 występują odpowiednio w Kornwalii i Devonie. [1]

Wyniki innych badań, przeprowadzonych jesienią 1998 r., zestawiono w poniższej tabeli:

Tabela 6.3 Podsumowanie dostępnych danych dotyczących zagrożenia radonowego w Wielkiej Brytanii, jesień 1998 r. [2]

Państwo	Liczba wyników	Średni poziom Rn [Bq/m ³]	Liczba domów powyżej poziomu „Aktion Level”	Najwyższa zmierzona wartość [Bq/m ³]
Anglia	375 00	21	37 100	10 000
Szkocja	6 600	16	220	2 200
Walia	5 600	20	220	1 200
Irlandia Północna	13 600	19	490	4 000
Wielka Brytania	400 000	20	38 000	10 000

Literatura:

1. B.J. Alloway, D.C Ayres „Chemiczne podstawy zanieczyszczenia środowiska:”, PWN, Warszawa 1999
2. G. M. Kendall, A. J. Macpherson “Radon in the United Kingdom” Indoor Air 1999, Official Conference of The International Academy of The Indoor Air Sciences, Edinburg, 1999

6.3.6 Chiny

Badania na temat występowania radonu w powietrzu wewnętrznym oraz ewentualnego stopnia ryzyka przebywania i pracy w tych pomieszczeniach przeprowadzono w prowincji Guandong, w której znajduje się najwięcej gorących źródeł w całym Chinach. Badania przeprowadzono w hotelach w Gaundong przy użyciu detektora radonu NR-667A(III) do pomiarów ciągłych. Stężenia radonu mierzono w pokojach hotelowych z łazienkami, w wodzie kranowej i powietrzu zewnętrznym. [1]

Otrzymano następujące wyniki:

- ✓ w wodzie z gorących źródeł 53,4 – 292,5 Bq/l
- ✓ w powietrzu zewnętrznym 17,2 – 190,9 Bq/m³
- ✓ w powietrzu w łazienkach pokoi hotelowych (gdy nie używano wody z gorących źródeł) 29,3 – 911,6 Bq/m³
- ✓ po 15 min kąpieli w wodzie z gorących źródeł 63,6 – 1917,8 Bq/m³
- ✓ po 30 min kąpieli w wodzie z gorących źródeł 79,2 – 2710,7 Bq/m³
- ✓ w pokojach hotelowych (bez wentylacji!) 32,7 – 4337,8 Bq/m³
- ✓ w pokojach hotelowych (po 1 h wentylacji) 137,6 – 213,3 Bq/m³ [1]

Uzyskane w wyniku przeprowadzonych pomiarów wartości koncentracji radonu w powietrzu hoteli w czterech resortach Gaundong wskazują, że użytkowanie wody z gorących źródeł w hotelach powoduje podwyższenie jego koncentracji w powietrzu wewnętrznym, a zwłaszcza w łazienkach. Ponieważ obserwowane wartości mogą przekraczać wartości dopuszczalne, zarówno dla pracowników tych hoteli, jak i turystów, należałoby przedsięwziąć odpowiednie środki (np.

zwiększenie wydajności wentylacji) w celu obniżenia zawartości radonu w powietrzu wewnętrznym. [a]

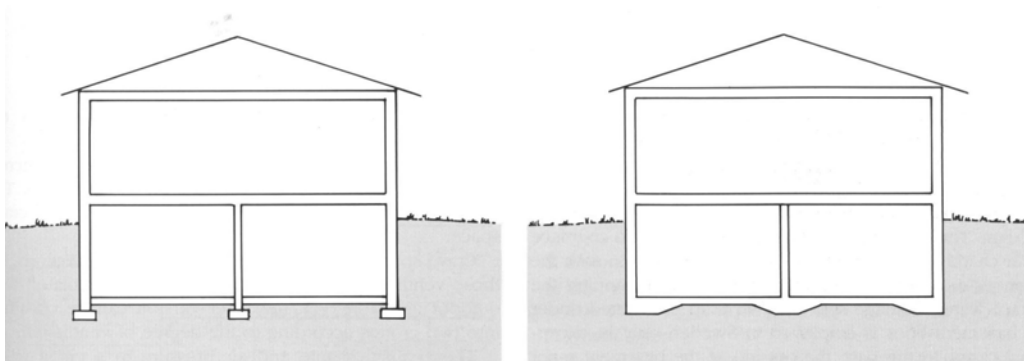
Literatura:

1. G. Song, B. Zhang, X. Wang, J. Gong, D. Chan, J. Bennett "Radon levels and dose estimation in some hot spring hotels", materiały konferencyjne, 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, "Indoor Air 2002", Monterey, California 2002

6.4 sposoby zapobiegania przedostawaniu się radonu do budynków [na podst. 1]

Zagadnienie zapobiegania przedostawania się radonu do budynków należy rozpatrywać w dwojaki sposób – w odniesieniu do budynków dopiero projektowanych, a więc jakie rozwiązania konstrukcyjne i wentylacyjne są korzystniejsze dla mieszkańców, oraz osobno w odniesieniu do budynków już istniejących – czyli w jaki sposób można zlikwidować, bądź zmniejszyć ścieżki przedostawania się radonu do wnętrza budynku.

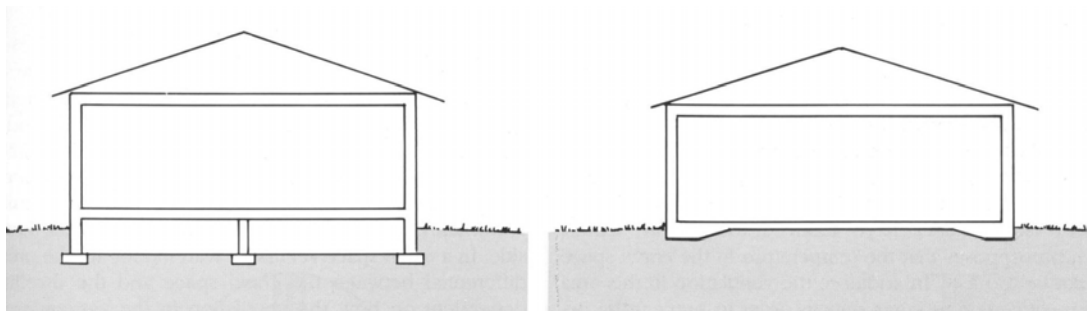
Domki jednorodzinne z piwnicą mają znacznie większą powierzchnię kontaktu z gruntem, niż domy niepodpiwniczone, dlatego też są one znacznie bardziej narażone na wnikanie radonu do ich wnętrza. Ilość przedostającego się do budynku gazu zależy również od rodzaju fundamentów (patrz rys. 6.10) - dotyczy to zarówno domów podpiwniczonych, jak i nie. Dla fundamentów pierwszego typu charakterystyczne jest, że występuje w nim znacznie więcej ścieżek przepływu, niż w typie 2, ponieważ jest tam duża ilość prześwitów pomiędzy płytą podłogową, a ścianami nośnymi. W krajach, w których emisja radonu z gruntu stanowi poważny problem, preferuje się obecnie drugi typ fundamentów – ze wzmocnionymi krawędziami.



Rys. 6.11 Domy podpiwniczone.

Fundamenty typu 1 po lewej, po prawej fundament typu 2 ze wzmocnionymi krawędziami [1]

W domach niepodpiwniczonych fundamenty wykonywane są z pozostawieniem pewnej przestrzeni pomiędzy gruntem, a podłogą domu (typ 3) lub też w formie monolitycznej płyty (typ 4) (Rys. 6.11).



Rys. 6.11 Domy niepodpiwniczone.

Fundamenty typu 3 po lewej, po prawej fundament typu 4 ze wzmocnionymi krawędziami [1]

Fundamenty 1 typu budowane są w ten sposób, że płyta podłogowa zostaje wylana po postawieniu ścian fundamentów, tak więc składają się one z kilku płyt ograniczonych ścianami. Ponieważ świeżo wylany beton kurzy się, w celu uniknięcia wystąpienia pęknięć, nowo wylewane płyty oddzielane były od ścian kartonem. Pozostałe szpary są niewidoczne gołym okiem, gdyż następnie pokryte zostały one warstwą cementu, lub zaprawy gipsowej pokrywającej ściany.

Fundamenty 2 typu wylewane są w postaci monolitycznej płyty. Płyta fundamentowa służy wówczas równocześnie za podłogę piwnicy.

Cechą charakterystyczną fundamentów 3 typu jest pozostawienie pewnej wolnej przestrzeni pomiędzy gruntem, a podłogą piwnicy. Przestrzeń ta często jest później odpowiednio wentylowana w celu zminimalizowania ilości przedostającego się do budynku gazu.

Domy typu 4 są często opisywane jako posadowione na płycie na gruncie, gdyż są one budowane na poziomie terenu. Z punktu widzenia zagrożenia radonowego typ 4 jest odpowiednikiem typu 2. Różnią się właściwie tylko sposobem izolacji termicznej na zewnętrznych krawędziach płyty.

Omówione powyżej typy fundamentów są typowe dla budownictwa w Szwecji. Domy wielorodzinne posadawiane są w bardzo podobny sposób. Jednakże w tego typu domach fundamenty są oddzielone od części mieszkaniowej. Jakikolwiek przeciek radonu z gruntu zostanie usunięty za pomocą wentylacji zanim nastąpi penetracja pod piwnicę, nie stanowi on więc poważnego zagrożenia dla mieszkańców. W przypadku gdy w domu wielorodzinnym znajdują się mieszkania będące w kontakcie z gruntem, zagrożenie jest podobne, jak w przypadku domów jednorodzinnych.

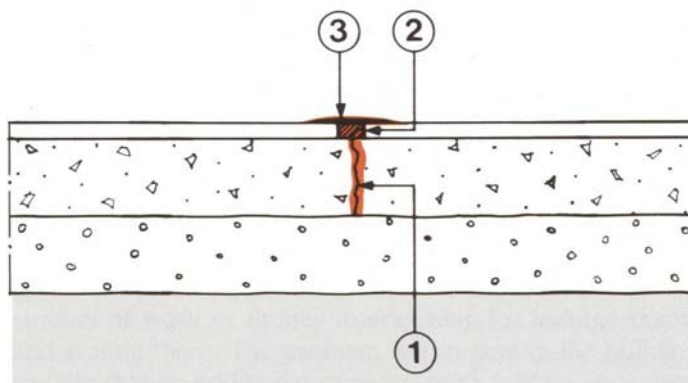
W przypadku istniejących budynków, działania zmierzające do usunięcia radonu z powietrza wewnętrznego można zakwalifikować do następujących grup:

- ✓ **usunięcie źródła radonu** – jest to zwykle rozwiązanie bardzo drogie i w przypadku emisji radonu z gruntu wręcz niemożliwe, poza wyjątkowymi sytuacjami. Zastąpienie materiału promieniotwórczego innym stanowi jednak całkowite rozwiązanie problemu i czasem może być uzasadnione.
- ✓ **wyeliminowanie radonu** w taki sposób, aby nie przedostał się on do powietrza pokojowego. W tym przypadku można zastosować kilka technik – zmiana ciśnienia powietrza, usunięcie szpar i rys, zastosowanie odpowiednich powłok.

- ✓ **usunięcie radonu**, który już przedostał się do powietrza pokojowego. Można to osiągnąć poprzez zaproponowanie odpowiedniego systemu wentylacji np. o zwiększonej ilości wymian powietrza.

W przypadku, gdy zwiększona zawartość radonu w powietrzu wewnętrznym wynika z emisji z gruntu, można zastosować następujące środki:

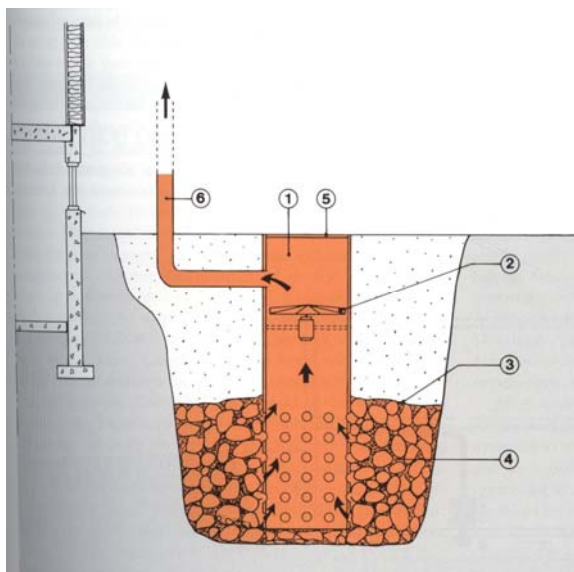
- ✓ łatanie dostępnych szpar, dziur i innych ścieżek, którymi radon może przedostawać się do wnętrza (Rys. 6.12).



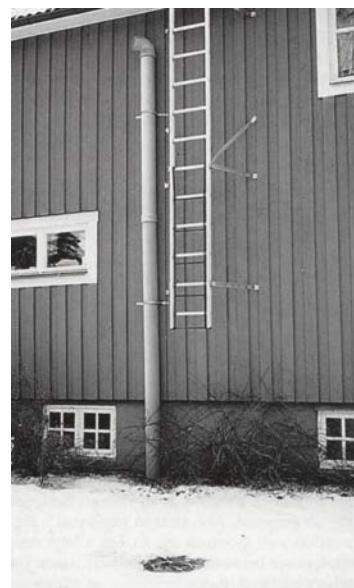
Rys. 6.12 Doszczelnianie i izolacja szpar [1]

- 1 Żywica epoksydowa
- 2 Rowek ze składnikiem doszczelniającym
- 3 Ewentualnie izolacja powierzchniowa

- ✓ instalacja ssawy lub studni radonowej (Rys. 6.13) w celu obniżenia ciśnienia powietrza w gruncie pod budynkiem i zapobieżenia w ten sposób przedostawaniu się bogatego w radon powietrza do wnętrza.



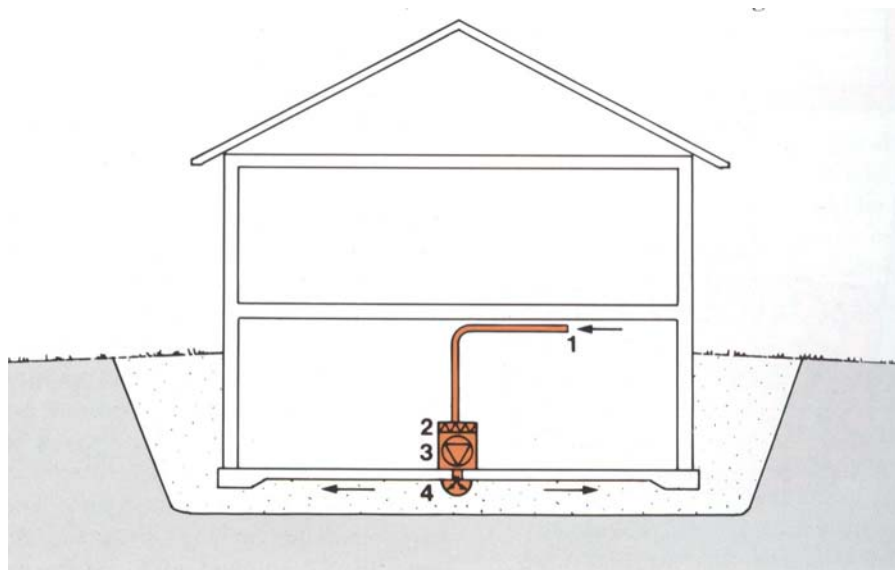
Rys. 6.13 Schemat studni radonowej



Rys.6.14 Przewód odprowadzający powietrze ze studni radonowej.

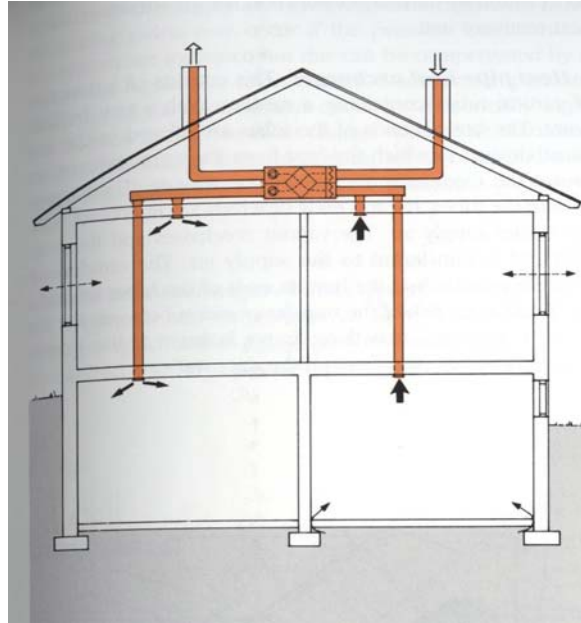
- 1 rura perforowana o średnicy 400 – 1000 mm
(wymiary rury są różne w zależności od przypadku)
- 2 wentylator
- 3 izolacja palstikowa
- 4 komora ssawna
- 5 pokrywa
- 6 przewód odprowadzający

- ✓ zmniejszenie ciśnienia w gruncie pod budynkiem przy pomocy rur drenażowych.
- ✓ instalacja systemu, którego zadaniem jest wytworzenie poduszki powietrznej pod budynkiem (rys. 6.15), czyli zwiększenie ciśnienia powietrza w gruncie znajdującym się najbliżej płyty fundamentowej poprzez wpompowywanie powietrza wewnętrznego do warstwy drenażowej.



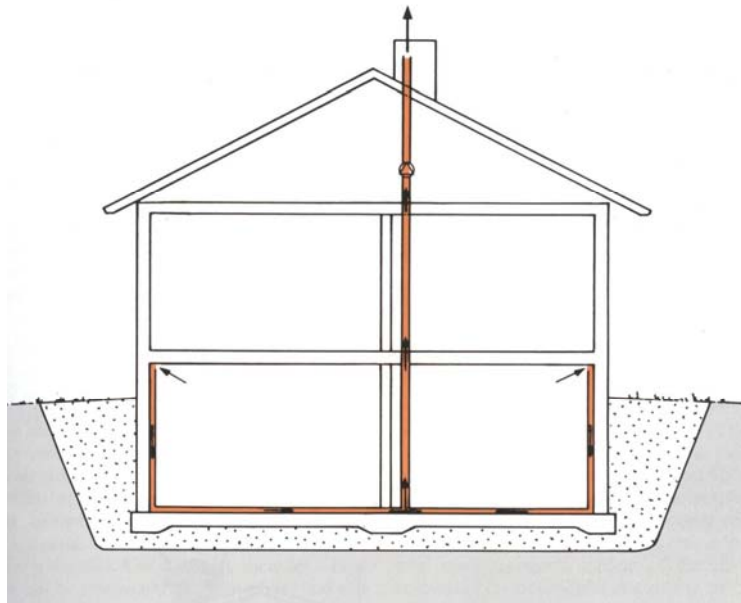
Rys. 6.15 Schemat instalacji poduszki powietrznej

- 1 część zużytego powietrza z domu zasysana jest do systemu
 - 2 filtracja w celu wyeliminowania cząstek kurzu i innych zanieczyszczeń, które mogłyby zablokować ścieżki przepływu powietrza w gruncie
 - 3 wentylator wytwarzający odpowiednie ciśnienie
 - 4 „dotek dystrybucji ciśnienia”
- ✓ instalacja systemu wentylacji mechanicznej nawiewnej i wywiewnej w budynku i odpowiednie zrównoważenie przepływów powietrza. Jest to relatywnie droga metoda i ma dość ograniczony wpływ na zawartość radonu w powietrzu wewnętrznym. Jednakże mechaniczny nawiew i wywiew powietrza zapewnia lepszy komfort użytkowania pomieszczeń (rys. 6.16).



Rys. 6.16 Przykład zastosowania systemu wentylacji mechanicznej

- ✓ aranżacja przestrzeni powietrznych nad powierzchnią podłogi i, gdy jest to niezbędne, również w ścianach piwnicy. Przestrzenie te powinny być odpowiednio wentylowane (rys. 6.17)

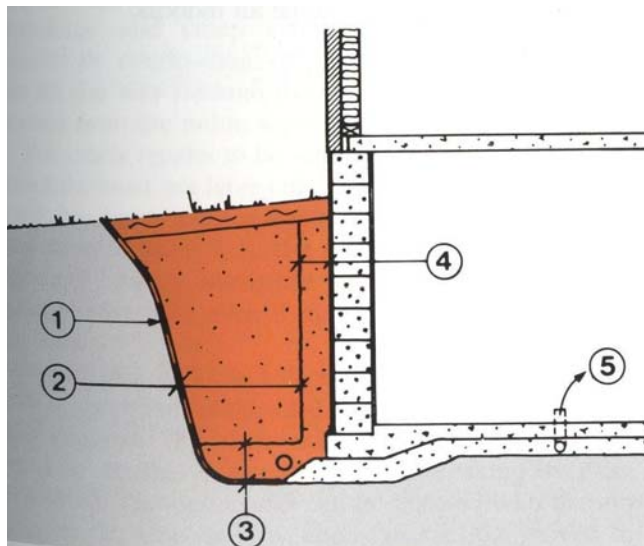


Rys. 6.17 Wentylowane przestrzenie powietrzne przy ścianach i podłodze, połączone z wentylatorem i wyrzutnią

- ✓ instalacja w zewnętrznej ścianie piwnicy prostego wentylatora wywiewającego powietrze.
- ✓ polepszenie wentylacji (zwiększenie stopnia wymiany powietrza) poprzez instalację dodatkowych nawiewów powietrza zewnętrznego.

- ✓ izolacja całej powierzchni podłogi przy użyciu materiału nieprzepuszczalnego dla radonu.

✓ wymiana całego radioaktywnego gruntu dookoła budynku (rys. 6.18). Jest to sposób bardzo kosztowny, ale może być efektywny, chyba że radioaktywny materiał występuje również pod budynkiem.



Rys. 6.18 Wymiana radioaktywnego gruntu przy budynku. Prace dookoła i pod budynkiem

- 1 ewentualnie warstwa izolacyjna
- 2 gleba o podwyższonej radioaktywności wymieniona na grunt mniej radioaktywny
- 3 drenaż i materiał wypełniający
- 4 materiał wypełniający i ochronny przed podsiąkaniem kapilarnym
- 5 miernik ciśnienia

W przypadku, gdy zwiększona zawartość radonu w powietrzu wewnętrznym wynika z emisji z materiałów budowlanych, najczęściej stosowaną metodą obniżenia zawartości tego gazu w powietrzu wewnętrznym jest zwiększenie stopnia wymiany powietrza. Można to zrealizować na kilka sposobów:

- ✓ dokładne zbadanie istniejącego systemu wentylacji poprzez otwarcie czerpni powietrza zewnętrznego i wyrzutni, czyszczenie przewodów wentylacyjnych oraz konserwację wentylatorów.
- ✓ przekształcenie istniejącego systemu wentylacji naturalnej na system mechaniczny wywiewny.
- ✓ instalację systemu mechanicznego nawiewnego i wywiewnego, najlepiej wyposażonego jeszcze w wymiennik ciepła lub pompę ciepła w celu minimalizacji poboru energii.

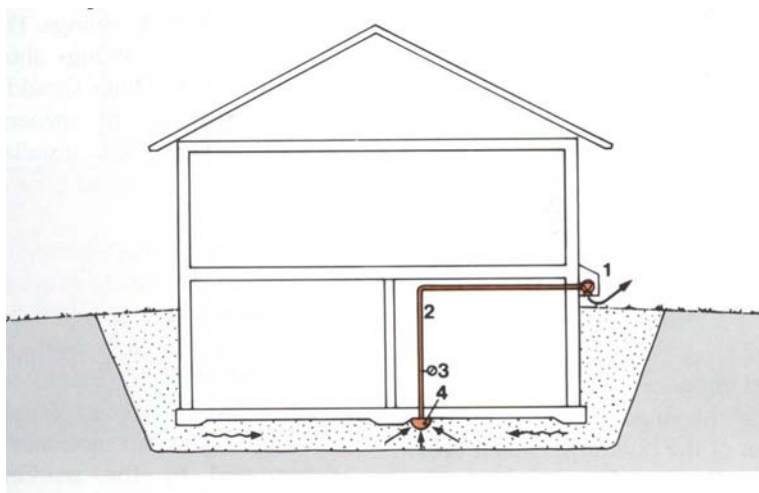
Inne środki, które można zastosować to:

- ✓ zastosowanie powłok izolacyjnych nieprzepuszczalnych dla radonu na powierzchniach lub częściach budynku, które zawierają najbardziej radioaktywne materiały
- ✓ aranżacja przestrzeni powietrznych nad powierzchniami.

- ✓ usunięcie materiału radioaktywnego

W przypadku gdy źródłem radonu jest zarówno grunt, jak i materiały budowlane najlepszym rozwiązaniem jest instalacja systemu wentylacji mechanicznej. Rozwiązanie to jest dość drogie, jednakże należy brać pod uwagę również inne plusy zastosowania tej metody. Alternatywę stanowią:

- ✓ instalacja podpłytkowego systemu ssącego (rys. 6.19) lub studni radonowej w połączeniu z prostą modyfikacją wewnętrznego systemu wentylacji polegającego na montażu kilku dodatkowych nawiewników powietrza zewnętrznego.



Rys. 6.19 Schemat montażu ssawy

- 1 Wentylator
- 2 Przewód o średnicy 70-110 mm ze stali lub PCV
- 3 Manometr do kontroli wartości różnicy ciśnień
- 4 „Dołek ssący”

- ✓ instalacja systemu zaprojektowanego do wytworzenia poduszki powietrznej pod budynkiem.

Literatura:

1. Bertil Clavensjö, Gustav Åkerblom „The Radon Book. Measures against Radon”, The Swedish Council for Building Research, Ljunglöfs Offset AB, Stockholm 1994

6.5 kalkulator indywidualnej dawki radonu

<http://www.antenna.nl/wise/uranium/rdcrn.html>

7 Uregulowania prawne w Polsce i za granicą

Występowanie radonu jest zjawiskiem naturalnym, co powoduje określone trudności w zakresie interpretacji prawnej w dziedzinie ochrony radiologicznej. Tradycyjnie, regulacje prawne dotyczyły ewidentnej sytuacji górnictwa rud uranu. W ostatnim czasie podejmowane są jednak próby wprowadzania odpowiednich uregulowań prawnych na inne rodzaje działalności powodującej narażenie na radon np. w kopalniach nieuranowych, uzdrowiskach, podziemnych miejscach pracy jak również na stanowiskach pracy naziemnych zlokalizowanych w tzw. „radon prone area”. Decyzje o wprowadzeniu w tym zakresie systemu ochrony radiologicznej są jednak trudne i niejednoznaczne. [1]

Zalecenia ICRP 65 oraz Basic Safety Standards IAEA proponują stosowanie do tego celu pojęcia tzw. „poziomów działania” (action level), przekroczenie którego wymaga wdrożenia systemu ochrony radiologicznej takiego jak dla zastosowań promieniowania. Równocześnie zróżnicowano sytuacje, w których narażenie na radon „jest wymagane lub związane bezpośrednio z pracą” i „wynika z pracy”. Zastosowanie tych pojęć do konkretnej sytuacji jest dyskusyjne. [1]

Nieco inaczej sprawa narażenia na radon rozwiązana jest przez Dyrektywę 96/29 Euratom. W dyrektywie tej nie została przyjęta koncepcja „poziomu działania” i w sposób jednoznaczny zakres stosowania dyrektywy rozszerzony został na te rodzaje działalności, które powodują znaczący wzrost narażenia pracowników i ludności na promieniowanie pochodzące ze źródeł naturalnych. Przedstawione zostały wymagania jakie w tym zakresie powinny zostać spełnione przez kraje członkowskie. [1]

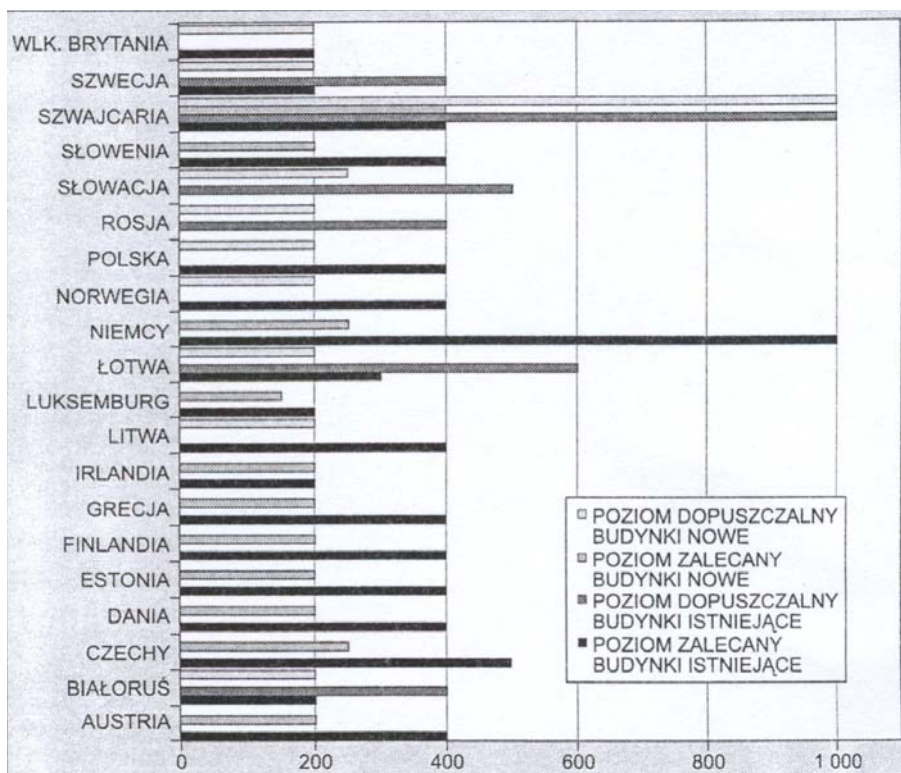
Pierwszym krajem, który wprowadził regulacje prawne dotyczące radonu w budynkach były Stany Zjednoczone Ameryki Płn. W roku 1979 ustalono limity stężeń radonu w domach budowanych na Florydzie w rejonie, gdzie istnieją i są eksploatowane złoża fosfatów oraz w Kolorado, w rejonach wydobywania i przeróbki rud uranowych. [2]

W Szwecji w 1979 roku powołano do życia Komisję Radonową, niedługo po tym, jak naukowcy Instytutu Ochrony Radiologicznej zmierzili wysokie stężenia radonu w budynkach wybudowanych na skałach wzbogaconych w związku uranu np. na łupkach aluminowych. [2]

Obecnie w większości państw istnieją przepisy określające dopuszczalne stężenia radonu w budynkach. W różnych krajach dopuszczalne wartości stężenia radonu w budynkach definiowane są w odmienny sposób. Generalnie, mimo zróżnicowanego nazewnictwa, przepisy w różnych krajach przeważnie określają dwa poziomy, powyżej których należy podjąć działania zaradcze:

- ✓ dopuszczalny (wyższy), powyżej którego konieczne jest podjęcie zdecydowanych i często wymagających znacznych nakładów finansowych działań zaradczych;
- ✓ zalecany (niższy), odnoszący się do budynków, gdzie prostymi i niedrogimi rozwiązaniami można znacznie zredukować stężenie radonu. [2]

Rysunek 7.1 przedstawia dopuszczalne stężenia radonu odnoszące się do domów już istniejących oraz nowobudowanych w różnych krajach europejskich. W większości krajów przyjęto niższy poziom dopuszczalny dla nowych budynków, niż dla konstrukcji starych. [2]



Rys. 7.1 Limity stężenia radonu w budynkach w różnych krajach [2]

Sytuacja prawna w Polsce w zakresie narażenia na radon jest dość skomplikowana, ponieważ sprawy te regulowane są w ramach trzech różnych działów prawnych: kodeksu pracy, prawa atomowego, prawa geologicznego i górniczego. Pomiedzy postanowieniami tych aktów prawnych występują rozbieżności i sprzeczności, które utrudniają właściwe sprawowanie nadzoru nad narażeniem zawodowym pracowników. [1]

O ochronie przed promieniowaniem jonizującym w budownictwie mówi Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. W dziale 8 rozdział 3, Ochrona przed promieniowaniem jonizującym i polami magnetycznymi określono następujące wymagania:

§313.1. Budynek z pomieszczeniami przeznaczonymi na pobyt ludzi i dla inwentarza żywego nie może być wykonany z materiałów i elementów wyposażenia niespełniających wymagań przepisów odrębnych w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia.

2. Średnie wartości roczne ekwiwalentnego stężenia radonu w pomieszczeniach budynku przeznaczonego na stały pobyt ludzi nie mogą przekraczać dopuszczalnej wartości, określonej w przepisach odrębnych dotyczących dawek granicznych promieniowania.

Dopuszczalne stężenia i natężenia czynników szkodliwych dla zdrowia określa Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r., z tym że przepis ten obowiązuje właściwie tylko dla środowiska pracy. W przypadku wymagań określonych w paragrafie 313 pkt.1 wymienionego rozporządzenia Ministra Infrastruktury należy, jako przywołany tam przepis odrębny, zastosować rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 3 grudnia 2002 r. w

sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych w surowcach i materiałach stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów. [2]


Jeżeli chodzi o zagrożenie radonem w pomieszczeniach mieszkalnych, to średnie wartości roczne stężenia radonu ^{222}Rn w pomieszczeniach budynku przeznaczonych na stały pobyt ludzi według Zarządzenia Prezesa PAA z 1995 r. nie mogą przekraczać: 200 Bq/m³ w budynkach oddawanych do użytku po dniu 1 stycznia 1998 r. oraz 400 Bq/m³ w budynkach istniejących. [2]


Literatura:

1. W. Chruscielewski „Prawne aspekty narażenia na radon w zaleceniach międzynarodowych i przepisach krajowych”, XVII Szkoła Jesienna, Materiały Konferencyjne, Zakopane 22-26 września 1997
2. J. Skowronek, B. Michalik, M. Wysocka, A. Mielnikow, J. Dulewski „Ochrona przed naturalnymi źródłami promieniowania”, PTJ Vol. 46, Z. 2. 2003

8 Ciekawostki

Czy wiesz, że:

 średnie stężenie radonu w wodzie światowej wynosi 1000 Bq/m³, podczas gdy średnia dla Finlandii to aż 25 000 Bq/m³, a dla Szwecji 38 000 Bq/m³!!! Woda oligoceńska w Warszawie zawiera od 122 do 8571 Bq/m³. [1]

 Podstawowym medium leczniczym w uzdrowiskach jest woda pochodząca z ujęć głębinowych w wysokim stopniu zmineralizowana, a niekiedy również zawierająca naturalny radioaktywny gaz radon. W Polsce znane są 4 uzdrowiska, w których wykorzystywana woda zawiera powyżej 75 Bq/l radonu. Są to Łądek, Szczawno, Świeradów i Przerzeszyn. Poza tym w uzdrowisku Cieplice przez pewien czas wykorzystywana była do celów leczniczych naturalna sztolnia kopalni rud uranu w Kowarach.

Badania wykazały, że w pomieszczeniach zabiegowych uzdrowisk radoczynnych stężenia radonu mogą osiągać wartość 5000 Bq/m³, a w sztolni pouranowej wykrywano w powietrzu stężenia na poziomie 500 000 Bq/m³. Średnie stężenie radonu w ciągu roku w pomieszczeniach uzdrowisk nieradoczynnych kształtowało się dla porównania na poziomie od 18 Bq/m³ w Świnoujściu do 135 Bq/m³ w Rymanowie. [2]

Literatura:

1. M. Siemiński „Środowiskowe zagrożenia zdrowia”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001
2. W. Chruscielewski „Radon w uzdrowiskach polskich”, XVII Szkoła Jesienna, Materiały Konferencyjne, Zakopane 22-26 września 1997

9 Ciekawe linki