



MATERIAŁ OPRACOWANY NA POTRZEBY KRAJOWEGO PLANU DZIAŁANIA W PRZYPADKU DŁUGOTRWAŁYCH ZAGROŻEŃ WYNIKAJĄCYCH Z NARAŻENIA NA RADON W BUDYNKACH PRZEZNACZONYCH NA POBYT LUDZI ORAZ W MIEJSCACH PRACY (MON. POL. Z 12 LUTEGO 2021, POZ.169)

Raport został opracowany w ramach zadań badawczych prowadzonych przez Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego PZH – Państwowy Instytut Badawczy finansowanych przez Ministra Zdrowia na podstawie umowy nr NIZP PZH-PIB/2021/1094/1056, ujętych w zadaniu nr 9: „Opracowywanie i realizacja programów w zakresie profilaktyki pierwotnej i wtórnej oraz promocji zdrowia”

**AUTOR:** DR HAB. MAŁGORZATA DOBRZYŃSKA, PROF. NIZP PZH – PIB  
WRAZ Z ZESPOŁEM ZAKŁADU HIGIENY RADIACYJNEJ I RADIOBIOLOGII NIZP PZH — PIB

## Spis treści

<b>POCHODZENIE I WYSTĘPOWANIE RADONU .....</b>	<b>2</b>
<b>WPŁYW RADONU NA ZDROWIE .....</b>	<b>4</b>
<b>RADON A PALENIE TYTONIU .....</b>	<b>8</b>

## Pochodzenie i występowanie radonu

W skorupie ziemskiej występują naturalnie pierwiastki promieniotwórcze. Promieniotwórczość naturalna powstaje na drodze rozpadów jąder atomowych naturalnych pierwiastków radioaktywnych obecnych w glebie, skałach, powietrzu i wodzie. Jądra atomowe samorzutnie rozpadają się emitując przy tym cząstki  $\alpha$  lub  $\beta$  albo promienie  $\gamma$ . Naturalne pierwiastki radioaktywne obecne są w minerałach, przyswajanych przez rośliny i zwierzęta oraz używanych jako materiały konstrukcyjne. Syntetyzowane są w atmosferze skąd przenikają do hydrosfery wskutek reakcji składników atmosfery z promieniowaniem kosmicznym. Ponadto, przenikają do środowiska wskutek działalności przemysłowej człowieka.

Szeregi promieniotwórcze to ciągi radionuklidów (radionuklid – jądro pierwiastka promieniotwórczego) powstających jeden z drugiego w wyniku naturalnych, spontanicznych przemian jądrowych  $\alpha$  i  $\beta$ , kolejnych rozpadów promieniotwórczych. Szereg kończy się nuklidem stabilnym. W przyrodzie istnieją szeregi uranowo-radowy, torowy i uranowo-aktynowy. Te trzy szeregi składają się z 43 nuklidów promieniotwórczych (izotopów) będącymi odmianami 12 pierwiastków chemicznych. Wśród nich jest 11 metali ciężkich (uran, rad, protaktyn, tor, polon, ołów, bizmut, aktyn, tal, astat, frans), a jeden (radon) jest gazem. Jednym z produktów rozpadu promieniotwórczego **uranu ( $^{238}\text{U}$ )**, jest odkryty przez laureatkę Nagrody Nobla Marię Skłodowską-Curie promieniotwórczy **rad ( $^{226}\text{Ra}$ )**, którego produktem rozpadu jest **radon (Rn)**.

Radon został odkryty w 1900 roku przez Fridricha Ernsta Dorna. Początkowo nazywany był emanacją. Dopiero w 1923 roku Międzynarodowy Kongres Nauki o Promieniotwórczości nadał mu obecną nazwę. **Radon** powstający z rozpadu radu występuje w środowisku naturalnie **emituje głównie promieniowanie  $\alpha$  i w mniejszym stopniu  $\beta$** . W związku z tym, że jest gazem, może wydostać się z skorupy ziemskiej do atmosfery wchodząc w skład powietrza atmosferycznego. Radon rozpada się tworząc tak zwany szereg krótkożyciowych, również promieniotwórczych pochodnych, do których należą m.in. izotopy polonu, bizmutu i ołowiu. Produkty rozpadu radonu, które są ciałami stałymi, łatwo przyłączają się do aerozoli istniejących w powietrzu i w wyniku oddychania dostają się do płuc. Stąd wynika potencjalne zagrożenie dla zdrowia człowieka.

Najczęściej występującym w przyrodzie izotopem radonu jest  $^{222}\text{Ra}$ . Izotopy to odmienne postacie pierwiastków chemicznych, posiadające tę samą liczbę atomową (liczba protonów jądrze), ale inną liczbę masową (łączna liczba protonów i neutronów w jądrze). Radon i jego krótkożyciowe produkty rozpadu, będące reaktywnymi izotopami metali ciężkich, odpowiadają za **niemal połowę dawki promieniowania jonizującego** otrzymywaną przez mieszkańców Polski od źródeł naturalnych. **Roczna całkowita dawka skuteczna promieniowania jonizującego**, która określa stopień narażenia całego ciała na promieniowanie nawet przy napromieniowaniu tylko niektórych partii ciała, otrzymana przez statystycznego mieszkańca Polski w 2020 roku wynosiła **3,96 mSv**. Wielkość dawki utrzymuje się na zbliżonym poziomie przez kilka ostatnich lat. **Narażenie od źródeł naturalnych stanowi 61,9% całkowitej dawki skutecznej** i wynosi **ok. 2,45 mSv/rok**. Największy udział w tym narażeniu ma **radon i produkty jego rozpadu**, od których statystyczny mieszkaniec Polski otrzymuje dawkę wynoszącą **ok. 1,20 mSv/rok**.

Radon jest gazem bezbarwnym, bezwonnym, pozbawionym smaku, niepalnym, jest ośmiokrotnie cięższy od powietrza. Rozpuszcza się w wodzie oraz w rozpuszczalnikach organicznych, świeci w ciemności i jest prawie całkowicie obojętny chemicznie. Najlepiej rozpuszcza się w zimnej wodzie, jego rozpuszczalność spada wraz ze wzrostem temperatury.

Emisja radonu uzależniona jest od budowy geologicznej. Na podstawie typu podłoża można spodziewać się podwyższonego stężenia tego gazu. Podwyższonego stężenia radonu można spodziewać się tam gdzie występuje uran, rad lub tor, a zwłaszcza w regionach, gdzie występują granity, zmetamorfizowane skały magmowe oraz łupki, w których występują złoża uranu. Dlatego, w Polsce podwyższone stężenie radonu występuje w Sudetach, gdzie występują złoża uranu i gdzie do lat 70-tych XX wieku zlokalizowane były kopalnie tego surowca. Typowa wartość aktywności właściwej radu w przypowierzchniowej warstwie skorupy ziemskiej wynosi około 35 Bq/kg, natomiast w Polsce kształtuje się w zakresie 5 – 120 Bq/kg, a średnia wartość wynosi ok. 26 Bq/kg.

**Średnie stężenie  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym w Polsce wynosi ok. 10 Bq/m<sup>3</sup>** i różni się w zależności od obszaru kraju. Przykładowo wynosi, w Kowarach ok. 30 Bq/m<sup>3</sup>, w Świeradowie Zdroju ok. 24,1 Bq/m<sup>3</sup>, w Karpaczu ok. 8,7 Bq/m<sup>3</sup>, w Warszawie ok. 2,7 Bq/m<sup>3</sup>. Na podstawie wyników dotychczasowych badań można przypuszczać, że obszary podwyższonego ryzyka obejmują 10% obszaru kraju, gdzie stężenie radonu w gruncie przekracza 50 Bq/m<sup>3</sup>. Są to regiony południowe.

## Wpływ radonu na zdrowie

Od 2015 roku z inicjatywy *Europejskiego Stowarzyszenia Radonowego (European Radon Association)* w dniu urodzin Marii Skłodowskiej-Curie (7 listopada) obchodzony jest *Europejski Dzień Radonu*. Celem Europejskiego Dnia Radonu jest **zwiększenie świadomości społeczeństwa na temat występowania radonu i związanych z tym konsekwencji zdrowotnych**.

**Radon dostaje się do organizmu człowieka głównie wraz z wdychanym powietrzem atmosferycznym.** Wdychana dawka tego pierwiastka zależy między innymi od jego stężenia w powietrzu, częstości oddechów, wentylacji płuc, czyli objętości powietrza przepływającej przez płuca w jednostce czasu, powierzchni wymiany gazowej w płucach i głębokości wniknięcia do płuc promieniotwórczych cząstek. Sam radon, jako gaz szlachetny nie stanowi dużego zagrożenia, gdyż nie wchodzi w reakcje z innymi cząsteczkami. Jest on jednak pierwiastkiem krótkożyciowym (okres połowicznego rozpadu to około 3,8 doby) i rozpada się na szereg innych pierwiastków, które są ciałami stałymi i mogą osadzać się w pęcherzykach płucnych, a następnie ulegać dalszym rozpadom, podczas których emitowane są cząstki  $\alpha$  i  $\beta$ . Szkodliwość radonu jest więc wynikiem stosunkowo szybkiego jego rozpadu, prowadzącego do powstania kilku krótkożyciowych pochodnych ( $^{222}\text{Po}$  i  $^{218}\text{Po}$ , ołów  $^{206}\text{Pb}$ ), również radioaktywnych. Pochodne radonu są wdychane wraz ze znajdującymi się w powietrzu pyłami, dymem tytoniowym, łączą się z cząsteczkami płynu tworząc tzw. aerozole promieniotwórcze. **Do pęcherzyków płucnych dostają się jedynie cząstki najmniejsze, posiadające średnicę poniżej 0,1  $\mu\text{m}$ . Cząstki o większych średnicach osadzają się w górnych drogach oddechowych, skąd mogą być usunięte podczas kaszlu w ciągu kilku godzin.** Najmniejsze cząstki migrują do pęcherzyków płucnych, emitują stąd promieniowanie  $\alpha$ . Mogą przebywać tam przez miesiące lub lata, przyczyniając się do napromieniowania narządów wewnętrznych. **Drobne cząstki promieniotwórcze mogą przenikać z pęcherzyków płucnych do krwi lub naczyń limfatycznych, a następnie przemieszczać się do węzłów chłonnych.** Rozpad pochodnych radonu (poprzez emisję cząstek  $\alpha$ ) na ściankach płuc ma istotny wpływ wielkość dawki otrzymanej przez organy wchodzące w skład układu oddechowego. Ich zatrzymanie w płucach może powodować uszkodzenia radiacyjne, prowadzące do rozwoju choroby nowotworowej. W ten sposób mogą zwiększać ryzyko występowania

nowotworów płuc. **Promieniowanie jonizujące, a dokładnie radon i jego pochodne wdychane z powietrzem atmosferycznym są drugim po paleniu tytoniu czynnikiem decydującym o zapadalności na nowotwór złośliwy płuc.**

Głównym skutkiem zdrowotnym występowania radonu w wysokich stężeniach są choroby nowotworowe układu oddechowego. Emitowane podczas rozpadów promieniowania  $\alpha$  i  $\beta$  mają zdolność jonizacji, czyli powodowania szeregu uszkodzeń w wyniku zderzeń z makrocząsteczkami takimi jak, białka, tłuszcze czy kwasy nukleinowe oraz stymulowania powstawania zwiększonej ilości szkodliwych wolnych rodników. Najbardziej niebezpiecznymi uszkodzeniami, wywołanymi przez promieniowanie, są zmiany w DNA, które mogą zakłócić prawidłowe funkcjonowanie całej komórki i w rezultacie prowadzić do powstania nowotworu. Ze względu na długi czas przebywania pochodnych radonu w pęcherzykach płuc, narząd ten jest szczególnie narażony na ich działanie. **Najważniejszym uszkodzeniem są zmiany w DNA, które mogą prowadzić do indukcji nowotworów układu oddechowego, głównie płuc, oraz białaczki.**

Końcowym produktem procesów rozpadu radonu jest stabilny ołów  $^{206}\text{Pb}$ , który może na stałe zostać wbudowany w organizm. Odkłada się on w pęcherzykach płucnych, z których przechodzi do krwiobiegu, a następnie wraz z krwią przenika do innych narządów. Przy dużym wchłanianiu tego pierwiastka, z czasem może dojść do objawów tzw. **ołowicy** i w rezultacie do uszkodzenia nerek, wątroby oraz układu nerwowego.

Już w XIX wieku opisano zwiększoną zapadalność na raka płuc wśród górników. Jednak dopiero w 1921 roku, analizując przypadki raka płuc u górników z czeskich i niemieckich kopalni, stwierdzono możliwy związek tej choroby z radonem. Podobne wyniki uzyskano w badaniach na zwierzętach narażanych na różne stężenia radonu i jego pochodne. Analiza zbiorcza *Komitetu Narodowej Akademii Nauk do spraw Biologicznych Efektów Promieniowania Jonizującego (BEIR)* przeprowadzona na przełomie XX i XXI wieku potwierdziła związek zwiększonej zapadalności na nowotwory płuc z narażeniem na radon.

Radon może osiągać szkodliwe stężenie również w powietrzu pomieszczeń mieszkalnych i biurowych. Przeprowadzona przez *Światową Organizację Zdrowia (WHO)* i opublikowana w 2009 roku analiza wyników badań na populacjach europejskiej, chińskiej i amerykańskiej, obejmująca łącznie 11 712 osób z rakiem

płuca i 20 962 osób zdrowych, wykazała zależność liniową pomiędzy czasem narażenia i stężeniem radonu, a ryzykiem rozwoju raka płuca.

Udowodniono, że stałe narażenie na wdychanie radonu i jego pochodnych jest szkodliwe, jednak od wielu lat wiadomo też, że **radon może działać prozdrowotnie**. W związku z tym, jest wykorzystywany w medycynie, głównie w zabiegach kąpielowych, do płukania jamy ustnej, do picia i inhalacji. Do terapii radonowych wykorzystuje się wody lecznicze pochodzące z naturalnych źródeł lub z odwiertów, rzadziej z wyrobisk po kopalniach uranowych. Za wody radoczynne uznaje się te o zawartości radonu powyżej 74 Bq/l, a za posiadające działanie lecznicze podczas kąpeli te o zawartości Rn powyżej 370 Bq/l.

Działanie wód radonowych opiera się na założeniu, że niewielkie dawki promieniowania indukują naprawę DNA w komórkach. Wykazano, że przy dawkach poniżej 100 mSv aktywowane są mechanizmy obronne prowadzące do eliminowania uszkodzonych komórek lub do naprawy uszkodzeń DNA. Według światowych obserwacji **korzystne działanie małych dawek promieniowania przeważa nad potencjalnym ryzykiem**. Przykładem są mieszkańcy japońskiego regionu Misasa, którzy korzystają ze znanych od 800 lat naturalnie radioaktywnych gorących źródeł (9,5 kBq/l, temp. 65°C). Pomimo, że tamtejsza ludność korzysta z nich nawet kilka razy dziennie, nie stwierdzono w tej populacji zwiększonej liczby mutacji, bezpłodności czy zaburzeń w obrazie morfologii krwi. Wręcz przeciwnie, częstość zgonów z powodu nowotworów jest tam prawie dwukrotnie niższa niż w okolicznych miejscowościach. Prozdrowotne działanie radonu potwierdza słuszność teorii, tzw. hormezy radiacyjnej, która zakłada, że niewielkie dawki promieniowania działają stymulująco na naprawę DNA w organizmie i aktywują mechanizmy ochronne neutralizujące wolne rodniki. To samo promieniowanie w dużych dawkach jest szkodliwe.

Uznaje się, że działanie terapii radonowej jest dwuetapowe. W pierwszym etapie działa bezpośrednio i krótkotrwale promieniowanie  $\alpha$ , emitowane podczas rozpadu radonu. Obejmuje to czas stosowania zabiegu i krótki czas po jego zakończeniu. W drugim etapie oddziałuje promieniowanie  $\alpha$  i  $\beta$ , pochodzące z dalszych rozpadów pochodnych radonu. To działanie zaczyna się po zastosowaniu kilku zabiegów i polega na bezpośrednim lub pośrednim działaniu na gruczoły wydzielania wewnętrznego. Efekt tego oddziaływania można zauważyć po około 2 tygodniach od rozpoczęcia kuracji, a jego utrzymywanie się nawet przez 2-3 miesiące po zakończeniu terapii.

Badania naukowe potwierdzają korzystne działanie kąpeli radonowych w chorobach obwodowego układu nerwowego, reumatycznych i narządu ruchu. Stosuje się je także w niektórych postaciach niewydolności wieńcowej, astmy, nadciśnieniu tętniczym i chorobach naczyń obwodowych, a także w zaburzeniach okresu przekwitania oraz niepłodności męskiej i żeńskiej. W wyniku terapii radonem następuje zwiększenie wydzielania hormonów kory nadnerczy (adrenaliny i noradrenaliny), a także hormonów płciowych żeńskich i męskich. Zabiegi tego typu korzystnie wpływają na skórę. Poprawiają jej ukrwienie i elastyczność, radon ma także działanie antyalergiczne, przeciwzapalne i przeciwświądowe. Przede wszystkim jednak kąpiele w wodach radoczynnych dają efekty przeciwbólowe, utrzymujące się nawet do 12 miesięcy po zakończeniu kuracji. Dlatego radonoterapia jest pomocna w leczeniu zmian zwyrodnieniowych stawów, kręgosłupa, a także w stanach po urazach i złamaniach.

Istnieją jednak przeciwwskazania do stosowania inhalacji i kąpeli radonowych, z których najważniejsze to istniejące już choroby nowotworowe, niewydolność krążenia czy padaczka. Ponadto, brakuje badań potwierdzających całkowite bezpieczeństwo stosowania inhalacji radonowych. Jednak przede wszystkim ich pozytywny i długotrwały wpływ przeciwbólowy, a przy tym możliwość ograniczenia stosowania środków farmakologicznych oraz inne korzyści zdrowotne sprawiają, że są one nadal chętnie stosowaną terapią w leczeniu wielu schorzeń.

## Radon a palenie tytoniu

Szkodliwość palenia tytoniu jest już powszechnie znana. Uważa się, że aktywne palenie odpowiada za około 90% zachorowań na raka płuc. Niewiele osób natomiast zdaje sobie sprawę, że kolejnym czynnikiem decydującym o zapadalności na nowotwór złośliwy płuc jest promieniowanie jonizujące, a dokładnie wdychanie występującego w powietrzu promieniotwórczego pierwiastka, jakim jest radon. Radon i jego pochodne są odpowiedzialne za znaczną liczbę nowotworów złośliwych płuc.

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) **radon jest drugim, tuż po paleniu tytoniu, najgroźniejszym czynnikiem wywołującym raka płuc na świecie, a u osób niepalących może być nawet główną przyczyną tego nowotworu.** Często narażenie to uważane jest za porównywalne z paleniem tytoniu. W związku z doniesieniami odnośnie związku narażenia na radon z ryzykiem wystąpienia raka płuc, w 1988 r. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) zakwalifikowała radon do **grupy 1 kancerogenów**. W 2005 r. Amerykańska Agencja ochrony Środowiska (EPA) uznała ekspozycję na radon w pomieszczeniach za drugi po paleniu tytoniu czynnik ryzyka wystąpienia raka płuc u osób palących oraz jako pierwszy u niepalących. Wzrost liczby przypadków raka płuc można zaobserwować już przy stężeniu radonu w powietrzu poniżej 200 Bq/m<sup>3</sup>. Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) od 3 do 14% przypadków raka płuc na świecie jest spowodowane przez radon w powietrzu pomieszczeń. Natomiast, Komitet Naukowy Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR) szacuje, że radon powoduje 1 na 10 przypadków nowotworów płuc. Z kolei badania polskie sugerują, że radon jest przyczyną 9% przypadków raka płuc.

Ponadto, **radon istotnie zwiększa ryzyko nowotworu u osób palących i odwrotnie**, palenie sprzyja rozwojowi raka płuc przy narażeniu na radon i jego pochodne. Występuje tu zjawisko synergizmu, czyli wzajemnego wzmacniania się działania dwóch czynników szkodliwych. **Niekorzystny wpływ radonu i palenia tytoniu łącznie jest większy niż suma efektów obu czynników.** Ryzyko wystąpienia raka płuc u palaczy narażonych na działanie radonu jest ok. 6-10 razy wyższe niż w przypadku osób niepalących.

Według Agencji Ochrony Środowiska (EPA) ekspozycja na radon na poziomie do 148 Bq/m<sup>3</sup> w ciągu całego życia spowoduje rozwój raka płuca u 7 osób spośród 1000 niepalących i aż u 63 osób spośród 1000



palących tytoń. Wyniki szwedzkich badaczy potwierdziły, że w przypadku jednakowych stężeń radonu ryzyko wystąpienia raka płuc u osób, które nigdy nie paliły było czterokrotnie niższe niż dla ogółu populacji i dziesięciokrotnie niższe niż ryzyko nowotworu u palących jedną paczkę papierosów dziennie.

Osoby palące wdychają radon pochodzący z dymu papierosowego. Toksyczny dym papierosowy, wdychany w pomieszczeniu o wysokim stężeniu radonu wnika głęboko do płuc. Tytoń może być nawożony fosfatami zawierającymi uran, z którego w wyniku rozpadu powstają: rad-226, radon-222, ołów-210 i polon-210. Zawartość tych pierwiastków radioaktywnych w dymie tytoniowym może być różna w zależności od rejonu upraw, sposobu nawożenia i technologii wytwarzania papierosów, dlatego trudno określić, jaką dawkę promieniowania wdychają palacze. Jednak amerykańscy lekarze szacują, że człowiek palący półtorej paczki papierosów dziennie przez rok otrzymuje dawkę promieniowania odpowiadającą 300 zdjęciom rentgenowskim.

Palenie bierne jest uważane za trzecią, po nadużywaniu alkoholu i aktywnym paleniu papierosów, przyczyną śmierci, której można uniknąć. W związku istniejącymi obecnie zakazami palenia w miejscach publicznych, na bierne wdychanie dymu tytoniowego jesteśmy najbardziej narażeni we własnych domach, jeśli mieszkamy z osobą aktywnie palącą. Udowodniono, że osoba codziennie wdychająca biernie dym tytoniowy ma wyższe o 15% ryzyko zgonu w porównaniu do osoby, która nie przebywa z osobami palącymi. Osoby biernie wdychające dym tytoniowy również pochłaniają wspomniane wcześniej pierwiastki promieniotwórcze zawarte w tytoniu, w tym radon, gdyż co najmniej połowa z tych izotopów ulatnia się do otoczenia. Uważa się, że dzieci są 1,5-2 razy bardziej wrażliwe na działanie wdychanego radonu i jego pochodnych niż osoby dorosłe. Badania przeprowadzone w Wielkiej Brytanii wykazały, że narażenie na radon w pomieszczeniach powoduje 1100 zgonów na raka płuc rocznie u osób palących obecnie i w przeszłości.