

# RADON – OCHRONA RADIOLOGICZNA I WPŁYW NA ORGANIZM CZŁOWIEKA

## *Radon – radiological protection and effects on human organism*

Sylwester Sommer, Patrycja Włudecka, Urszula Zielińska

**Streszczenie:** Radon jest radioaktywnym gazem szlachetnym, obecnym w środowisku człowieka. Jest on drugim po paleniu papierosów czynnikiem odpowiedzialnym za powstawanie raka płuc. W 2019 r. do prawa polskiego została zaimplementowana Dyrektywa Rady Unii Europejskiej 2013/59/EURATOM (tak zwana BSS) wymagająca czynnej ochrony przed stężeniami radonu powyżej 300 Bq/m<sup>3</sup>. Jednak problem jakiego stężenia radonu zwiększają ryzyko powstawania nowotworów płuc jest tematem dyskusji naukowej i nie jest jednoznaczny. Cytogenetyczne efekty działania radonu można pokazać przy pomocy testu kometowego w limfocytach krwi obwodowej oraz przy pomocy analizy częstości mikrojąder w komórkach nabłonkowych pochodzących z worka policzkowego.

**Abstract:** Radon is a radioactive noble gas present in the human environment. It is the second factor behind lung cancer after smoking cigarettes. In 2019, the European Council Directive 2013/59/EURATOM (so-called BSS) was implemented into Polish law, requiring active protection against radon concentrations above 300 Bq/m<sup>3</sup>. However, the problem of what radon levels increase the risk of lung cancer is a topic of scientific discussion and is not clear. The cytogenetic effects of radon can be demonstrated using a comet assay in peripheral lymphocytes or the micronucleus frequency analysis in buccal epithelial cells.

**Słowa kluczowe:** radon, ochrona radiologiczna, mikrojądra, komórki nabłonkowe pochodzące z worka policzkowego.

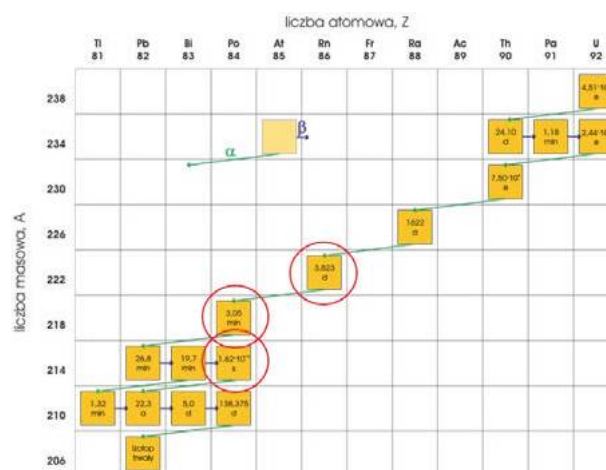
**Key words:** radon, radiation protection, micronucleus, buccal epithelial cells.

### Co to jest radon

Radon jest radioaktywnym gazem szlachetnym obecnym w środowisku człowieka. Znamy 30 izotopów radonu, wszystkie są radioaktywne. Tylko 3 z nich są naturalne, a najbardziej rozpowszechniony w środowisku jest Rn 222, pochodzący z szeregu promieniotwórczego uranowo-radowego, o okresie półrozpadu wynoszącym 3,82 dnia. W trakcie rozpadu radonu generowana jest cząstka  $\alpha$  oraz powstają kolejne izotopy, które rozpadają się w krótkim czasie (minuty) generując 2 kolejne cząstki  $\alpha$  oraz promieniowanie  $\beta$  i  $\gamma$  (rys. 1). Radon powstaje w skałach w skorupie ziemskiej i następnie migruje na powierzchnię ziemi poprzez uskoki geologiczne, spękania, przepuszczalne gleby oraz jako rozpuszczalny w wodzie przez ciekłe wodne. Dzięki temu, że radon może być obecny w materiałach budowlanych oraz gromadzi się w budynkach, jest największą składową naturalnego narażenia na promieniowanie ogółu populacji [1]. Statystyczny Polak otrzymał w 2017 r. 3,56 mSv dawki efektywnej ze źródeł naturalnych i sztucznych w tym 1,2 mSv od radonu i jego pochodnych (główną składową dawki od radonu jest promieniowanie  $\alpha$ ).

Ponieważ radon jest gazem, a emitowane przez niego i jego pochodne promieniowanie  $\alpha$  nie przechodzi przez skórę, miejscem jego działania w naszym organizmie są głównie płuca. Tam też, jak i w drogach odde-

chowych osadzają się aerozole z promieniotwórczymi pochodnymi radonu metalami: polonem 218 i 214. Radon jest wskazywany przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) jako druga przyczyna, po paleniu papierosów, indukcji nowotworów płuc [3].



**Rys. 1.** Szereg promieniotwórczy uranowo-radowy (Wikipedia, zmieniony) [2]. Cząstki  $\alpha$  emitowane są przez sam radon 222 oraz jego pochodne polon 218 i polon 214 – czerwone obwódki

**Fig. 1.** Uranium series (Wikipedia, changed) [2]. The  $\alpha$  particles are emitted by radon 222 itself and its daughters polonium 218 and polonium 214 - red borders

## Ochrona przed radonem w Polsce

Ryzyko ekspozycji na radon zostało uwzględnione w przepisach dotyczących ochrony radiologicznej. Należy podkreślić, że mamy tutaj do czynienia z ochroną przed promieniowaniem naturalnym, co jest odstępstwem od przyjętej filozofii, która kładła nacisk na ochronę przed promieniowaniem antropogenicznym.

Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi z dnia 7 grudnia 2017 r. (Dz. U. z 2017 r., poz. 2294) ustala stężenie 100 Bq/dm<sup>3</sup> radonu w wodzie, jako graniczne powyżej którego należy ocenić, czy obecność substancji promieniotwórczych stanowi zagrożenie dla zdrowia ludzi i wymaga dalszych działań naprawczych. Rozporządzenie wprowadza również obowiązek systematycznego monitorowania i raportowania poziomu radonu, izotopów radu Ra-226 i Ra-228 oraz trytu w ujęciach wody, przez producentów wody do celów handlowych i przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne.

Miejscem pracy gdzie szczególnie istnieje narażenie na radon, są kopalnie. Górnicy, tak jak osoby zawodowo pracujące z promieniowaniem nie mogą przekroczyć dawki efektywnej 20 mSv rocznie. Jednak w tym przypadku dawka pochodzi głównie od radonu, ale również od radu – wody kopalniane i promieniowanie γ w powietrzu [4]. Szczegółowe przepisy wykonawcze dotyczące ochrony radiologicznej pracowników kopalni znajdują się w rozporządzeniu Ministra Energii z 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych oraz w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2017 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz. U. z 2015 r. poz. 1702 z późn. zm.). Należy podkreślić, że istnieje grupa zawodowa, przewodnicy podziemnych tras turystycznych, która jest narażona na znaczące dawki radonu, a nie jest objęta systemem ochrony radiologicznej [5].

Pod koniec września 2019 r. ukazał się tekst jednolity ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe. Zawiera on między innymi implementację tzw. Dyrektywy BSS, czyli Dyrektywy Rady Unii Europejskiej 2013/59/EURATOM, która ustanawia podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego. Państwa członkowskie ustanawiają krajowe poziomy referencyjne dla stężeń radonu w pomieszczeniach. Poziomy referencyjne dla średniego rocznego stężenia promieniotwórczości radonu w powietrzu nie mogą być wyższe niż 300 Bq/m<sup>3</sup>. Taki właśnie poziom referencyjny został przyjęty w Polsce. Głos w tej sprawie zabrała również organizacja WHO, proponując poziom odniesienia w wysokości 100 Bq/m<sup>3</sup> dla pomieszczeń [6].

Dyrektywa BSS wymaga czynnej ochrony przed promieniowaniem jonizującym, punkt drugi artykułu 74, „W ramach krajowego planu działania, o którym mowa w art. 103, państwa członkowskie propagują działania mające na celu zidentyfikowanie budynków mieszkalnych, w których stężenie radonu (jako średnia roczna) przekracza poziom referencyjny i zachęcają, w stosownych przypadkach za pomocą środków technicznych lub finansowych, do wprowadzania w tych budynkach środków służących ograniczeniu stężenia radonu.” Nie zostały jeszcze wydane przepisy wykonawcze do tej części ustawy – Prawo atomowe przez Ministra Środowiska, Ministra Zdrowia i Głównego Inspektora Sanitarnego.

Do tej pory w Polsce praktycznie nie wykonuje się badań stężenia radonu w pomieszczeniach. Teoretycznie nabywca nieruchomości może zażądać od sprzedawcy czegoś w rodzaju „certyfikatu radonowego” przy kupnie lokalu. Być może implementowanie dyrektywy BSS zmieni tę sytuację, ponieważ wymaga pomiarów w miejscach pracy i budynkach publicznych. W Stanach Zjednoczonych wykonuje się takich pomiarów setki tysięcy czy nawet więcej rocznie.

## Biologiczne działanie radonu, epidemiologia, radon a papierosy

Radon i jego pochodne dostają się do naszego organizmu głównie przez układ oddechowy, co powoduje zwiększenie ryzyka chorób płuc i krtani. Emitowane przez radon i jego pochodne cząstki α uszkadzają materiał genetyczny komórek płuc i oskrzeli powodując powstanie mutacji i aberracji, które mogą być początkiem nowotworzenia. Pierwsze prace pokazujące, że narażenia na radon może indukować raka płuc, pochodzą z badań kohortowych górników [7].

W kolejnych latach wykazano, że również w zakresie takich stężeń radonu, które mogą występować w budynkach mieszkalnych, istnieje korelacja stężenia radonu i ryzyka nowotworów płuc [8]. Niektórzy badacze kwestionują tę zależność np. wielokrotnie komentowana i krytykowana praca Cohena (1995), który pokazał zmniejszenie umieralności na nowotwory płuc wraz z rosnącym stężeniem radonu w budynkach mieszkalnych u mieszkańców 1729 hrabstw w Stanach Zjednoczonych czy metaanaliza Dobrzyńskiego (2018) obejmująca 34 prace, w której nie stwierdzono zależności pomiędzy zapadalnością na raka płuc a rosnącym stężeniem radonu, do wartości 1000 Bq/m<sup>3</sup> [9, 10].

Niemniej jednak ochrona radiologiczna w tym zakresie opiera się na założeniu, że istnieje zależność między stężeniem radonu a ryzykiem raka płuc [7, 8]. Takie podejście, oparte na hipotezie LNT (Linear Non Threshold, Liniowa Bezprogowa hipoteza działania promieniowania) prezentuje model zaproponowany

przez VI Raport BEIR (1999) oraz publikacje WHO [3, 11]. Według WHO radon jest drugim po paleniu papierosów czynnikiem wywołującym raka płuc na świecie. Szacuje się, że odpowiada on za 3 do 14% przypadków zachorowań, w zależności od średniego stężenia radonu w danym kraju i stosowanych metod statystycznych. W dodatku uważa się, że radon istotnie zwiększa ryzyko palenia papierosów i jeżeli chodzi o nowotwory płuc, to czynniki te działają synergistycznie [12, 13]. Większość przypadków zachorowań na raka płuc wywołanego przez radon występuje u palaczy [3].

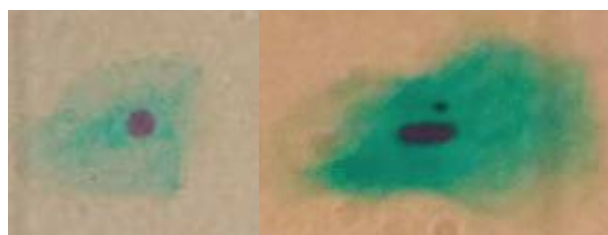
### Analiza częstości mikrojąder w komórkach nabłonkowych pobranych z worka policzkowego - metoda pokazująca cytotoksyczne i genotoksyczne działanie radonu

Tak jak opisano w poprzednim rozdziale istnieje naukowy spór czy niskie stężenia radonu (do 1000 Bq/m<sup>3</sup>) zwiększają ryzyko powstania choroby nowotworowej. Ważnym argumentem w dyskusji mogłoby być pokazanie, że środowiskowe, często spotykane stężenia radonu wywołują możliwe do zaobserwowania efekty cytotoksyczne, cytogenetyczne czy genotoksyczne (biomarkery). Wiele badań pokazuje, że zwiększenie częstości np. mikrojąder, fragmentów acentrycznych czy chromosomów dicentrycznych u zdrowych dawców koreluje, w badaniach retrospektywnych, z ryzykiem rozwoju różnych rodzajów nowotworów [14, 15].

Ostatnio ukazała się praca Walczaka (2019) z Instytutu Medycyny Pracy im. prof. Jerzego Nofera w Łodzi pokazująca brak korelacji stężenia radonu w miejscu zamieszkania ze wskaźnikami genotoksycznymi takimi jak częstość mikrojąder we krwi obwodowej oraz poziom przeciwciał przeciwko białku p-53 w surowicy krwi obwodowej [16]. Ta sama grupa badała również wpływ radonu na pojedynczoniowe i podwójnoniowe pęknięcia DNA (alkaliczna wersja testu kometowego oraz analiza częstości ognisk histonu gamma-H2AX) oraz na uszkodzenia oksydacyjne zasad (test kometowy w modyfikacji z formamidopirymidyną) [17]. Stwierdzono, że test kometowy w wersji alkalicznej pokazuje istotnie więcej uszkodzeń DNA u osób ekspozowanych na całoroczne stężenia radonu równe lub powyżej 100 Bq/m<sup>3</sup> niż w grupie ekspozowanej na niższe stężenia radonu.

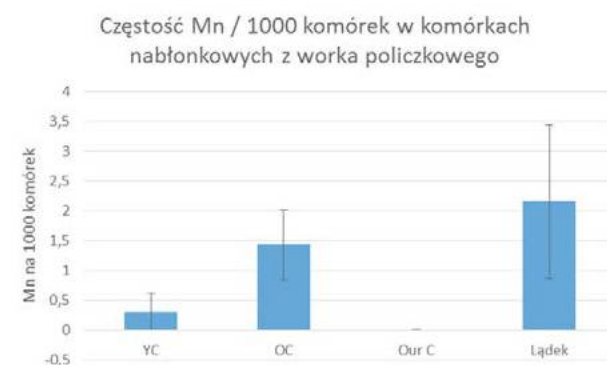
Jednak najbardziej wiarygodnym testem pokazującym potencjalny genotoksyczny wpływ radonu może być analiza częstości mikrojąder w komórkach nabłonkowych pobranych z worka policzkowego (rys. 2). Istotną sprawą jest, że radon wdychany z powietrzem do płuc przechodzi przez jamę ustną, a błona śluzowa jest dobrą powierzchnią do osadzania się aerozoli z radioaktywnymi produktami rozpadu radonu. Należy podkreślić, że jest to metoda nieinwazyjna, bo materiał do badania pobierany jest w postaci wymazów z jamy ustnej.

Dotychczasowe prace demonstrują zależność częstości mikrojąder (oraz ich wskaźników genotoksycznych i cytotoksycznych możliwych do zbadania w komórkach nabłonkowych) od stężenia radonu w miejscu zamieszkania [18, 19]. Metoda jest używana w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej. Na rys. 3 demonstrujemy częstości mikrojąder u 5 osób mieszkających w miejscu o wysokim stężeniu radonu w porównaniu z kontrolami – osobami z województwa mazowieckiego i kontrolami z literatury [20]. Badania zostały przeprowadzone w trakcie przygotowywania pracy inżynierskiej pani Urszuli Zielińskiej pt. „Zastosowanie metody mikrojądrowej w komórkach nabłonka jamy ustnej do biomonitoringu narażenia na radon”, obronionej na Politechnice Warszawskiej w 2019 roku [21].



**Rys. 2.** Komórki nabłonkowe z jamy ustnej. Na zielono zabarwiona cytoplazma, na fioletowo jądra komórkowe. Na lewym zdjęciu nieuszkodzona komórka nabłonkowa, na prawym zdjęciu nad jądrem widoczne mikrojądro (fot. Urszula Zielińska)

**Fig. 2.** Buccal epithelial cells. Cytoplasm – green color, cell nuclei – purple color. In the left photo an intact buccal cell, in the right photo a micronucleus visible above the nucleus (photos by Urszula Zielińska)



**Rys. 3.** Częstość mikrojąder w komórkach nabłonkowych z worka policzkowego. YC – osoby kontrolne w wieku 18 – 26 lat, OC – osoby kontrolne w wieku 64 – 75 (Thomas 2009), Our C – 3 osoby kontrolne z ICHTJ, Łądek – 5-cioro pracowników uzdrowiska Łądek Zdrój. Pionowe słupki obrazują 95% przedział ufności. Widać, że u osób żyjących i pracujących na terenie o wyższym stężeniu radonu znaleziono wyższą częstość mikrojąder. Test Manna - Whitneya pomiędzy osobami kontrolnymi z ICHTJ, a osobami z Łądką Zdroju pokazał, że różnice są statystycznie istotne ( $p = 0,037$ ).

**Fig. 3.** The frequency of micronuclei in buccal epithelial. YC - control people aged 18-26, OC - control people aged 64-75 (Thomas 2009), Our C - 3 control people from ICHTJ, Łądek - 5 employees of the health resort Łądek Zdrój. Vertical bars represent the 95% confidence interval. It can be seen that a higher frequency of micronuclei was found in people living and working in areas with higher radon concentrations. The Mann-Whitney test between controls from ICHTJ and people from Łądek Zdrój showed that the differences were statistically significant ( $p = 0.037$ )

*Sylwester Sommer,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa*

*Patrycja Włudecka,  
Uniwersytet Warszawski,  
Wydział Fizyki,  
Warszawa*

*Urszula Zielińska  
Politechnika Warszawska,  
Wydział Fizyki,  
Warszawa*

#### Literatura:

- [1] J. Henschke. Ocena narażenia radiacyjnego ludności Polski w 2017 roku. Raport roczny CLOR 2017, pod redakcją P. Krajewskiego, Raport CLOR Nr 159, Warszawa 2018;
- [2] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Szereg\\_promieniotw%C3%B3rczy#/media/Plik:Szereg\\_promieniotw%C3%B3rczy\\_uranowo-radowy.svg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Szereg_promieniotw%C3%B3rczy#/media/Plik:Szereg_promieniotw%C3%B3rczy_uranowo-radowy.svg);
- [3] WHO Handbook on indoor radon. A public health perspective. Edited by Hajo Zeeb, and Ferid Shannoun. World Health Organization 2009;
- [4] Raport Roczny Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2018 roku. Warszawa 2019;
- [5] K. Walczak, J. Olszewski, P. Politański, M. Zmyślony. Occupational exposure to radon for underground tourist routes in Poland: Doses to lung and the risk of developing lung cancer. *Int J Occup Med Environ Health*. 2017 Jul 14;30(5): 687-694;
- [6] <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>;
- [7] J.H. Lubin, J.D. Boice Jr, C. Edling, R.W. Hornung, G. Howe, E. Kunz, R.A. Kusiak, H.I. Morrison, E.P. Radford, J.M. Samet, et al. Radon-exposed underground miners and inverse dose-rate (protraction enhancement) effects. *Health Phys*. 1995 Oct;69(4): 494-500;
- [8] S.C. Darby, E. Whitley, G.R. Howe, S.J. Hutchings, R.A. Kusiak, J.H. Lubin, H.I. Morrison, M. Tirmarche, L. Tomásek, E.P. Radford, et al. Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J Natl Cancer Inst*. 1995 Mar 1;87(5): 378-84;
- [9] B.L. Cohen. Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. *Health Phys*. 1995 Feb;68(2): 157-74;
- [10] L. Dobrzyński, K.W. Fornalski, J. Reszczyńska. Meta-analysis of thirty-two case-control and two ecological radon studies of lung cancer. *J Radiat Res*. 2018 Mar 1;59(2): 149-163;
- [11] BEIR VI. Health Effects of Exposure to Radon. National Academy Press, Washington, D.C. 1999;
- [12] K.M. Butler, L. Huntington-Moskos, M.K. Rayens, A.T. Wiggins, E.J. Hahn. Perceived Synergistic Risk for Lung Cancer After Environmental Report-Back Study on Home Exposure to Tobacco Smoke and Radon. *Am J Health Promot*. 2019 May; 33(4): 597-600;
- [13] C. Meenakshi, M.N. Mohankumar. Synergistic effect of radon in blood cells of smokers - an in vitro study. *Mutat Res*. 2013 Sep 18;757(1): 79-82;
- [14] A. Fucic, S. Bonassi, S. Gundy, J. Lazutka, R. Sram, M. Ceppi, J.N. Lucas. Frequency of Acentric Fragments Are Associated with Cancer Risk in Subjects Exposed to Ionizing Radiation. *Anticancer Res*. 2016 May; 36(5):2451-7;
- [15] S. Bonassi, A. Znaor, M. Ceppi, et al. An increased micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes predicts the risk of cancer in humans. *Carcinogenesis*, 2007, 28, 625–631;
- [16] K. Walczak, J. Olszewski, K. Domaradzka-Gajda, P. Politański, M. Zmyślony, K. Kowalczyk, M. Stępnik. Micronuclei frequency in peripheral blood lymphocytes and levels of anti-p53 autoantibodies in serum of residents of Kowary city regions (Poland) with elevated indoor concentrations of radon. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*. 2019 Feb; 838: 67-75;
- [17] K. Walczak, J. Olszewski, P. Politański, K. Domaradzka-Gajda, K. Kowalczyk, M. Zmyślony, M. Stępnik. Genotoksyczny biomonitoring mieszkańców obszaru mineralizacji uranowej. XVIII Kongres Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych. 2019 Kielce;
- [18] A.E. Marcon, J.A. Navoni, M.F. de Oliveira Galvão, A.C.F.S. Garcia, V.S. do Amaral, R.A. Petta, T.F.D.C. Campos, R. Panosso, A.L. Quinelato, S.R.B. de Medeiros. Mutagenic potential assessment associated with human exposure to natural radioactivity. *Chemosphere*. 2017 Jan; 167: 36-43;
- [19] D.P.S. Linhares, P.V. Garcia, C. Silva, J. Barroso, N. Kazachkova, R. Pereira, M. Lima, Camarinho R3, T. Ferreira, A. Dos Santos Rodrigues. DNA damage in oral epithelial cells of individuals chronically exposed to indoor radon (<sup>222</sup>Rn) in a hydrothermal area. *Environ Geochem Health*. 2018 Oct; 40 (5): 1713-1724;
- [20] P. Thomas et al., "Buccal micronucleus cytome assay," *Nat. Protoc.*, vol. 4, no. 6, pp. 825–837, 2009;
- [21] U. Zielińska. Zastosowanie metody mikrojądrowej w komórkach nabłonka jamy ustnej do biomonitoringu narażenia na radon. Praca dyplomowa inżynierska na kierunku fizyka techniczna, w specjalności fizyka medyczna, 2019 Politechnika Warszawska.