

¹Ewa Gawelek, ¹Bogna Drozdowska, ²Anna Fuchs

RADON AS A RISK FACTOR OF LUNG CANCER

RADON JAKO CZYNNIK RYZYKA RAKA PŁUCA

Medical University of Silesia, Katowice, Poland

¹School of Medicine with the Division of Dentistry in Zabrze, ²Department of Pathomorphology,

²Department of Women's Health, School of Public Health

Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach

¹Katedra i Zakład Patomorfologii, Wydział lekarski z Oddziałem Lekarsko-Dentystycznym w Zabrzu

²Wydział nauk o zdrowiu, Katedra Zdrowia Kobiety

ABSTRACT

Radon is the second leading cause of lung cancer after smoking. Indoor radon concentration poses a significant and potentially subject to the prevention risk factor of lung cancer development. The paper presents the history of studies assessing occupational and indoor radon exposure and an impact of international organizations for raising public and political awareness about the consequences of long term exposure to residential radon, resulting in the European Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation.

Key words: *lung cancer, radon, indoor exposure*

STRESZCZENIE

Radon jest drugą, co do częstości, wiodącą przyczyną raka płuca po paleniu tytoniu. Wewnątrzdomowe stężenie radonu stanowi znaczący i podlegający zapobieganiu czynnik rozwoju raka płuca. Praca przedstawia historię badań nad zawodową i wewnątrzdomową ekspozycją na radon oraz działania międzynarodowych organizacji w celu podniesienia publicznej i politycznej świadomości na temat konsekwencji długotrwałej ekspozycji na radon w przestrzeni mieszkalnej, skutkujące Dyrektywą Rady Europejskiej 2013/59/Euratom z dnia 5 grudnia 2013 r., ustanawiającą podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego.

Słowa kluczowe: *rak płuca, radon, ekspozycja wewnątrzdomowa*

INTRODUCTION

Radon was discovered in 1900 by a German chemist F. E. Dorn (1). In 1988 an International Agency for Research on Cancer (IARC) has incorporated radon to Group 1 carcinogens, based on the reports concerning the relationship between occupational exposure and environmental radon risk of developing lung cancer (2 - 6). In 2005, the US Environmental Protection Agency (EPA) recognized indoor exposure to radon as the second leading risk factor for lung cancer after smoking (4) and the first risk factor in non-smokers, responsible for 3 - 20% of deaths from lung

WSTĘP

Radon został odkryty w 1900 r. przez chemika F. E. Dorna (1). W 1988 r. Międzynarodowa Agencja do spraw Badań nad Rakiem (IARC) włączyła radon do kancerogenów grupy 1, bazując na doniesieniach dotyczących związku narażenia zawodowego oraz środowiskowego na radon z ryzykiem rozwoju raka płuca (2 - 6). W 2005 r. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) uznała wewnątrzdomową ekspozycję na radon za drugi wiodący czynnik ryzyka raka płuca po paleniu tytoniu (4) oraz pierwszy czynnik ryzyka u osób niepalących, odpowiadający za 3 - 20 % zgonów z powodu

cancer, depending on the average radon concentration in individual countries and the methods used for estimating (3). In 2013 on a global scale, the number of deaths associated with environmental exposure to radon has reached approximately 92 000 cases (5). It has been demonstrated a clear linear relationship between time and intensity of exposure and the risk of lung cancer. There is no known *threshold* below which *radon* exposure carries no risk (2).

CHARACTERISTICS OF RADON AND THE CONNECTION BETWEEN RADON EXPOSURE AND THE HISTOPATHOLOGICAL SUBTYPES OF LUNG CANCER

Radon (^{222}Rn) is responsible for approximately 50-54% of the natural radiation exposure that we will experience in our *lifetimes* (4,7); it is a radioactive gas with a half-life of 3.8 days; it is a decay product of radium (^{226}Ra) and uranium (^{238}U) (8), which deposits are in the earth and rocks, in amounts depending on the arrangement of the geological formations (2,4). Inhalation of radon causes penetration of alpha particles emitted by decay products (^{218}Po and ^{214}Po) into the human pulmonary epithelium. A single alpha particle can cause DNA mutations, even in a few cells, which multiplies the effect of exposure, creating probable, suggested, lack of a threshold concentration below which no negative health effects were observed (8).

Radon is released to the surface through the slots, pipes and from the groundwater deposits. It can reach harmful levels in tunnels, caves, mines and homes and become a factor of exposure (2,4). The existing varying report data suggest a connection between radon exposure and all the major histological subtypes of lung cancer, in particular, small-cell carcinoma and squamous cell carcinoma. Single studies show a higher risk of for a large cell carcinoma with increasing indoor concentrations of radon ($p = 0.27$), as well as the dependence "dose - response" in case of adenocarcinoma in female smokers and ex-smokers ($p = 0.04$). A review of the literature concerning non-smokers is restricted, providing unsteady data on the connection between adenocarcinoma and the radon exposure (9).

OCCUPATIONAL EXPOSURES AND LUNG CANCER AMONG THE MINERS - FIRST EVIDENCES.

In 1879 in Schoenberg (Saxonia) lung cancer associated with environment was first described (6). Becquerel's discovery of spontaneous radioactivity, as well as measurements of the concentration of radon in the mines reaching up to $50\,000\text{ Bq/m}^3$, in the nineteenth century led Ludewig and Lorenzer to the conclusion

raka płuca w zależności od średniej koncentracji radonu w poszczególnych krajach oraz przyjętych metod szacowania (3). W 2013 r. w skali globalnej, liczba zgonów związana z ekspozycją środowiskową na radon osiągnęła około 92 000 przypadków (5). Wykazano wyraźną zależność liniową pomiędzy czasem i natężeniem ekspozycji, a ryzykiem rozwoju raka płuca, oraz brak wartości progowej stężenia radonu, poniżej której nie zaobserwowano by efektów negatywnych dla zdrowia (2).

CHARAKTERYSTYKA RADONU I ZWIĄZEK Z PODTYPAMI HISTOPATOLOGICZNYMI RAKA PŁUCA

Radon (^{222}Rn) odpowiada za 50-54 % naturalnego promieniowania jonizującego, na jakie jesteśmy narażeni w ciągu życia (4,7); jest radioaktywnym gazem o okresie połowicznego zaniku 3,8 dnia; stanowi produkt rozpadu radu (^{226}Ra) i uranu (^{238}U) (8), których złoża występują w ziemi i skałach, w ilościach zależnych od rozmieszczenia formacji geologicznych (2,4). Inhalacja radonu powoduje penetrację cząstek alfa emitowanych przez produkty jego rozpadu (^{218}Po i ^{214}Po) w głąb nabłonka płuc. Pojedyncza cząstka alfa może powodować mutacje DNA nawet w kilku komórkach, co zwielokrotnia efekt ekspozycji, czyniąc prawdopodobnym sugerowany brak stężenia progowego, poniżej którego nie zaobserwowano by efektów negatywnych dla zdrowia (8).

Radon uwalnia się na powierzchnię przez szczeliny, rury i złoża wód podziemnych. W tunelach, jaskiniach, kopalniach i mieszkaniach może osiągać stężenie szkodliwe i stanowić czynnik narażenia (2,4). Dotychczasowe zmienne doniesienia sugerują związek ekspozycji na radon z wszystkimi głównymi podtypami histologicznym raka płuc, w większości prac z rakiem drobnokomórkowym i płaskonabłonkowym. Pojedyncze badania wskazują na wzrost ryzyka dla raka wielkomórkowego płuca wraz z przyrostem stężeń radonu w przestrzeni wewnątrz mieszkalnej ($p = 0.27$), jak również zależność „dawka - odpowiedź” dla gruczolakoraka wśród kobiet palących i byłych palaczy tytoniu ($p = 0,04$). Przegląd literatury dotyczącej niepalących jest ograniczony, dostarczając niestałych danych na temat związku gruczolakoraka i ekspozycji na radon (9).

EKSPOZYCJA ZAWODOWA WŚRÓD GÓRNIKÓW - PIERWSZE DOWODY NA ZWIĄZEK RADONU Z RAKIEM PŁUCA.

W 1879 r. w miasteczku Scheenberg w Saxonii powstał pierwszy opis środowiskowo uwarunkowanego raka płuc (6). Odkrycie promieniotwórczości naturalnej przez *Becquerela*, a także pomiary stężeń radonu w kopalniach dochodzące do $50\,000\text{ Bq/m}^3$, doprowa-

that radon is responsible for the increased incidence of lung cancer in miners (1), what was confirmed by numerous epidemiological studies on occupational exposures (9). Crucial data on occupational exposure among miners are from two large cohort studies: pooled analysis of the Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) which include 11 conducted until 1990 main studies from Europe, North America, Asia and Australia (a total of 60 000 miners, including 2 600 deaths from lung cancer), and measurements performed in Germany among men (59 001 people; 2 388 deaths from lung cancer) employed by the Wismut Company. Additional relative risk of death (*excess relative death risk - ERR*) from cancer was expressed in the unit of mining industry WLM - "working level month"; 1 WLM is the concentration of short-lived decay products e.g. 1 liter of radon in the air leading to the release of alpha particles with an energy of 1.3×10^5 MeV "working level" (WL), for the month of work "working month" - 170 h. Final results showed almost linear increase of the additional relative risk of death from lung cancer in relation to the accumulated exposure ratio, respectively $ERR = 0.44\%$ (95% confidence interval 0.2 - 1%), and $ERR = 21\%$ (95% confidence interval 0.18 - 0.24%) for each additional WLM, depending on the time elapsed since exposure (supreme respectively 5 - 14 and 15 - 24 years), age of exposure (highest in people at a younger age) and radon concentration (*ERR* showed higher growth miners exposed to lower the concentration of radon over a 1 WLM in comparison to those exposed to higher concentrations of radon) (2).

ENVIRONMENTAL EXPOSURE – INDOOR CONCENTRATION OF RADON AND A RISK OF LUNG CANCER

Epidemiological studies performed since 1980, and then a series of controlled clinical trials confirmed the influence of radon on lung cancer risk in the general population (2).

The environmental exposure was expressed as the mean concentration of radon per cubic meter of air - Bq/m^3 (WLM can be converted to $100Bq/m^3$ assuming that $1Bq/m^3$ is the equivalent of 0.00027 WL, while respondents spend at home 70% of the time, what is $365.25 \times 24/170 = 51.6$, "working month" per year) (2). Temporary fluctuations of the concentration of radon in homes (in comparison to the following years, seasonal, depending on the weather and the habit of airing rooms), required the use described variability of "long-term average radon concentration" (2-3). Combining the results of a meta-analysis from Europe (13 studies), China (2 studies) and The USA

dziły *Ludewiga i Lorenzer* w XIX, do wniosku, że za zwiększone występowanie nowotworów płuc u górników odpowiedzialny jest radon (1), co potwierdziły liczne badania epidemiologiczne ekspozycji zawodowej (9). Kluczowe dane dotyczące ekspozycji zawodowej wśród górników pochodzą z dwóch dużych badań kohortowych: analizy zbiorczej *Komitetu Narodowej Akademii Nauk do spraw Biologicznych Efektów Promieniowania Jonizującego (BEIR)*, który uwzględnił 11 z przeprowadzonych do 1990 r. głównych badań z Europy, Północnej Ameryki, Azji i Australii (łącznie 60 000 górników, w tym 2 600 zmarło z powodu raka płuca) oraz pomiarów przeprowadzonych w Niemczech wśród mężczyzn (59 001 osób; 2 388 zmarło z powodu raka płuca) zatrudnionych przez Wismut Company. Dodatkowe ryzyko względne zgonu (*excess relative death risk - ERR*) z powodu raka wyrażano w jednostce przemysłu kopalnianego WLM - "working level month"; 1 WLM to stężenie krótkotrwałych produktów rozpadu np. radonu w 1 litrze powietrza prowadzące do uwolnienia cząstek alfa o energii $1,3 \times 10^5$ MeV „working level” (WL), w trakcie miesiąca pracy „working month” - 170 h. Ostateczne wyniki wykazały niemal liniowy wzrost dodatkowego ryzyka względnego zgonu z powodu raka płuca w stosunku do skumulowanej ekspozycji wynoszący odpowiednio $ERR = 0,44\%$ (95% przedział ufności 0,2 - 1 %) oraz $ERR = 21\%$ (95% przedział ufności 0,18 - 0,24 %) na każdy dodatkowy WLM, zależny od czasu, który upłynął od ekspozycji (najwyższy odpowiednio po 5 - 14 i 15 - 24 latach), wieku ekspozycji (najwyższy u osób w młodszym wieku) i stężenia radonu (wyższy wzrost *ERR* wykazywali górnicy ekspozowani na niższe stężenie radonu na 1 WLM w porównaniu do ekspozowanych na wyższe stężenia radonu) (2).

EKSPOZYCJA ŚRODOWISKOWA – ZWIĄZEK STĘŻENIA RADONU W POMIESZCZENIACH Z RYZYKIEM RAKA PŁUCA

Badania epidemiologiczne prowadzone od 1980 r., a następnie szereg badań kliniczno - kontrolnych potwierdziły wpływ radonu na ryzyko raka płuca w populacji ogólnej (2).

Ekspozycję środowiskową wyrażano jako średnie stężenie radonu na metr sześcienny powietrza - Bq/m^3 (WLM można przeliczyć na $100Bq/m^3$ przyjmując, że $1Bq/m^3$ jest ekwiwalentem 0,00027 WL, natomiast badani spędzają w domu 70% czasu, czyli $365.25 \times 24/170 = 51.6$ „working month” rocznie) (2). Czasowe wahania stężenia radonu w domach (w stosunku do kolejnych lat, sezonowe, w zależności od pogody oraz zwyczaju wietrzenia pomieszczeń), wymagały zastosowania uwzględniającego opisaną zmienność „długoterminowego średniego stężenia radonu” (2-3). Połączenie wy-

(7 studies), involving a total of 11 712 people with lung cancer and 20 962 people from a control group showed a linear relationship “dose - response” without the presence of a threshold below which exposure to radon would not carry the risk. If meta-analysis are treated separately, an additional increase of relative risk of lung cancer (ERR) for each 100Bq/m³ of increase of the concentration of radon was respectively ERR = 8.4% (95% confidence interval 3 - 16%), ERR = 13% (95% confidence interval 1-36%) and ERR = 11% (95% CI 0-28%), and in general, for three studies there was estimated ERR = 10% (p = 0.007), obtaining doubling the value after considering the time, “the long-term variability of radon indoor concentration” in each trial. There were no statistically significant differences in gender and age and depending on the status of smoking. A statistically significant increase of risk was demonstrated also in houses with radon concentrations below 200Bq/m³ (reference level in many countries). Moreover, the risk of lung cancer was 20% higher (95% confidence interval 3 - 30%) for people exposed to radon concentration of 100 - 199Bq/m³ in comparison to exposed to concentrations below 100Bq/m³ (the level recommended by the World Health Organization -WHO) (2).

ENVIRONMENTAL EXPOSURE – PREVENTION POSSIBILITIES

Based on studies concerning indoor average radon concentration performed in the majority of 30 member countries of the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (Table I.) a quantitative calculation of cases of lung cancer associated with radon exposure was made (2). Exposure assessment was based on evidence provided by the BEIR study or direct evidences provided by the collective research in Europe.). Other suggested models are the exposure-age-concentration model (the EAC model), the exposure - age – duration model (EAD), the model proposed by the EPA and the model of 2 mutations carcinogenesis (3).

The average indoor radon concentration in the world is about 39Bq/m³ (2); while in Europe, there is a range between 21Bq/m³ and more than 110 Bq/m³ (1.3). Radon concentrations in buildings in most of the countries can be presented as the log-normal distribution with the dominance of results in the lower range of values. Therefore, most cases of lung cancer associated with radon exposure result from exposure to low and medium concentrations of radon (2,3), and will appear in people exposed to radon concentrations far below the applicable reference values (3). In order to provide a population risk an attributable risk (AR), expressing part of the risk of developing the disease, is

ników metaanalizy europejskiej (13 badań), chińskiej (2 badania) i amerykańskiej (7 badań) obejmujących łącznie 11 712 osób z rakiem płuca i 20 962 kontrole, wykazało zależność liniową „dawka - odpowiedź” bez obecności progu, poniżej którego ekspozycja na radon nie niesłaby żadnego ryzyka. Dla traktowanych oddzielnie metaanaliz wzrost dodatkowego ryzyka względnego raka płuca (ERR) na każde 100Bq/m³ wzrostu stężenia radonu, wynosił odpowiednio ERR = 8,4% (95% przedział ufności 3 - 16%), ERR = 13% (95% przedział ufności 1-36%) oraz ERR = 11% (95% przedział ufności 0-28%). Natomiast sumarycznie dla 3 badań zbiorczych oszacowano ERR = 10% (p = 0.007), uzyskując podwojenie wartości po uwzględnieniu czasowej „długoterminowej zmienności stężenia radonu w pomieszczeniach” w każdym z badań. Nie stwierdzono statystycznie znaczących różnic dla płci i wieku oraz w zależności od statusu palenia tytoniu. Statystycznie istotny wzrost ryzyka wykazano również w domach o stężeniu radonu poniżej 200Bq/m³ (poziom referencyjny w wielu krajach) ponadto ryzyko raka płuc było 20% wyższe (95% przedział ufności 3 - 30%) dla osób narażonych na stężenie radonu 100 - 199Bq/m³ w porównaniu do narażonych na stężenie poniżej 100Bq/m³ (poziom zalecany przez Światową Organizację zdrowia -WHO) (2).

EKSPOZYCJA ŚRODOWISKOWA – MOŻLIWOŚCI ZAPOBIEGANIA

Na podstawie badań średniego stężenia wewnątrzdomowego radonu przeprowadzonych w większości z 30 krajów członkowskich *Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD)* (Tab. I.) dokonano ilościowych wyliczeń przypadków raka płuca związanego z ekspozycją na radon (2). Ocenę ekspozycji przeprowadzono w oparciu o dowody dostarczone przez badania BEIR lub bezpośrednie dowody dostarczone przez zbiorcze badania w Europie. Inne proponowane modele oceny ekspozycji to ekspozycja – wiek – stężenie (EAC), ekspozycja – wiek – czas trwania (EAD), model zaproponowany przez EPA oraz model kancerogenezy 2 mutacji (3).

Średnie stężenie radonu w przestrzeni wewnątrzdomowej na świecie wynosi około 39Bq/m³ (2); w Europie natomiast mieści się w zakresie od 21Bq/m³ do ponad 110 Bq/m³ (1,3). Dystrybucję stężeń radonu w budynkach w większości krajów najlepiej oddaje rozkład logarytmicznie normalny z dominacją wyników w niższym zakresie wartości. Zatem większość przypadków raka płuca związanego z ekspozycją na radon wynika z narażenia na niskie i średnie stężenia (2,3) i pojawi się u osób narażonych na stężenia radonu poniżej dotychczas obowiązujących wartości referencyjnych (3). W celu przedstawienia ryzyka populacyjnego stosuje się ryzyko przypisane (*attributable risk – AR*)

applied. It is associated with a specific exposure and, therefore, it can be prevented, by excluding the exposure (3). The risk of death associated with lung cancer caused by radon exposure is estimated from AR = 3% (United Kingdom) to AR = 20% (Sweden). The above results show a direct correlation with the average concentration of indoor radon in the country - respectively from 20Bq/m³ in the UK to 108Bq/m³ in Sweden. Higher AR was observed in women than in men, but the differences are reduced, taking into account tobacco use (3). The annual number of deaths from lung cancer associated with radon exposure is 150 (Netherlands) to 40 477 (South Korea). The differentiation of the results may be a consequence of adopting different models of risk assessment (3). Comparison of the number of deaths from lung cancer associated with exposure to radon for the sample countries and the percentage of deaths that can be prevented by limiting radon exposure are presented in Table II.

wyrażające udział ryzyka rozwoju danej choroby, który wiąże się z określoną ekspozycją, a zatem można mu zapobiec poprzez jej wykluczenie (3). Ryzyko przypisane zgonu z powodu raka płuca wywołanego ekspozycją na radon szacuje się na poziomie od AR = 3 % (Wielka Brytania) do AR = 20 % (Szwecja). Powyższe wyniki wykazują bezpośrednią korelację ze średnim stężeniem wewnątrzdomowym radonu w danym kraju – odpowiednio od 20Bq/m³ w Wielkiej Brytanii do 108Bq/m³ w Szwecji. Wyższy AR obserwowano u kobiet niż u mężczyzn, różnice ulegają jednak zmniejszeniu przy uwzględnieniu statusu palenia tytoniu (3). Roczna liczba zgonów z powodu raka płuca przypisywana ekspozycji na radon wynosi od 150 (Holandia) do 40 477 (Korea Południowa). Zróżnicowanie wyników może być konsekwencją przyjęcia różnych modeli oceny ryzyka (3). Zestawienie liczby zgonów z powodu raka płuc związanego z ekspozycją na radon dla przykładowych krajów oraz procent zgonów, którym można zapobiec ograniczając ekspozycję przedstawiono w Tabeli II.

Table I. The average radon concentration (Bq/m³) in individual countries [1]
Tabela I. Średnie stężenia radonu (Bq/m³) w poszczególnych państwach [1]

| Country | Arithmetic mean | Geometric mean | Geometric standard deviation |
|-------------------|-----------------|----------------|------------------------------|
| Mexico | 140 | 90 | - |
| Luxembourg | 110 | 70 | 2 |
| Sweden | 108 | 56 | - |
| Spain | 90 | 46 | 2,9 |
| Ireland | 89 | 57 | 2,4 |
| Norway | 89 | 40 | - |
| Slovakia | 87 | - | - |
| Switzerland | 78 | 51 | 1,8 |
| Italy | 70 | 52 | 2,1 |
| Portugal | 62 | 45 | 2,2 |
| Republic of Korea | 53 | 43 | 1,8 |
| Poland | 49 | 31 | 2,3 |
| USA | 46 | 25 | 3,1 |
| Netherlands | 23 | 18 | 1,6 |
| New Zealand | 22 | 20 | - |
| United Kingdom | 20 | 14 | 3,2 |
| Japan | 16 | 13 | 1,8 |
| Iceland | 10 | - | - |
| Worldwide average | 39 | | |

Reference levels (RL) of the radon concentration in buildings vary depending on the country (3,7). Maximum accepted by the International Commission on Radiological Protection (ICRP), the intensity of radon radioactivity is 300 Bq/m³ (4). In Europe there is a RL = 200 Bq/m³ (Ireland, Hungary, the United Kingdom, Denmark, Sweden, Canada), or as recommended by WHO – RL = 100Bq/m³ (Germany). The exceptions is

Poziomy referencyjne (PR) stężenia radonu w budynkach są zróżnicowane w zależności od kraju (3,7). Maksymalne akceptowane przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP) natężenie radioaktywności radonu wynosi 300 Bq/m³ (4). W Europie obowiązuje PR = 200 Bq/m³ (Irlandia, Węgry, Wielka Brytania, Dania, Szwecja, Kanada) lub zalecany przez WHO PR = 100Bq/m³ (Niemcy). Do wyjąt-

RL = 400Bq/m³ applicable for old buildings in Finland. In the United States it is adopted, proposed by the EPA in 1987, a RL = 148Bq/m³ (4 pCi / L - the concentration of radon in the air in the USA is measured in units of picocuries per litre - 1 pCi / L = 37 Bq/m³) (3.7).

ków należy PR = 400Bq/m³ obowiązujące dla starych budynków w Finlandii. W Stanach Zjednoczonych przyjęto zaproponowany przez EPA w 1987 r. PR = 148Bq/m³ (4 pCi/L - jednostka amerykańska pikokuriury na litr - 1 pCi/l = 37 Bq/m³) (3,7).

Table II. Number of deaths from lung cancer per year attributable to radon in selected countries and potential effects of prevention (2).

Tabela II. Roczna liczba zgonów z powodu raka płuca przypisywana ekspozycji na radon w wybranych krajach oraz potencjalne efekty prewencji (2).

| Country | model used in risk estimation | Number of radon - attributable lung cancer deaths per year | | | | | | Mitigation level of indoor radon concentration / Radon - attributable lung cancer deaths that can be prevented | | | | |
|----------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | Ever-smokers | | | Never-smokers | | | 37 Bq/m ³ | 74 Bq/m ³ | 148 Bq/m ³ | | |
| USA (1999) | BEIR-VI ¹ , EAC ² , | Male | Female | Total | Male | Female | Total | 11,0 % | 7,8 % | 4,2 % | | |
| | | 11300 (12,5%) | 7600 (13,7%) | 18900 (12,9%) | 1200 (25,8%) | 1700 (26,9%) | 2900 (26%) | 9,2 % | 6,5 % | 3,7 % | | |
| | | 6,8 % | 4,0 % | 1,7 % | | | | | | | | |
| | BEIR-VI ¹ , EAD ³ , | 7900 (7,5%) | 5400 (9,6%) | 13300 (9,1%) | 900 (18,9%) | 1200 (19,7%) | 2100 (19,1%) | 7,7 % | 5,5 % | 3,1 % | | |
| | | | | | | | 6,5 % | 4,7 % | 2,7 % | | | |
| | | | | | | | 4,9 % | 2,8 % | 1,2 % | | | |
| Germany (2008) | European pooling study ⁴ | 1390 (5%) | 347 (5,2%) | 1737 | 32 (5,2%) | 7600 (13,7%) | 159 | 100 Bq/m ³ | 150 Bq/m ³ | 200 Bq/m ³ | 250 Bq/m ³ | 400 Bq/m ³ |
| | | | | | | | | 302 (15,9%) | 197 (10,4%) | 143 (7,5%) | 115 (6,1%) | 68 (3,6%) |
| Canada (2012) | EPA Model ⁵ | 1639 (15,3%) | 1198 (14,3%) | 2837 (14,0%) | 166 (29,5%) | 258 (27,0%) | 424 (20,4%) | 100 Bq/m ³ | 200 Bq/m ³ | 400 Bq/m ³ | 600 Bq/m ³ | 800 Bq/m ³ |
| | | | | | | | | 1704 (52,3%) | 1540 (9,8%) | 345 (10,6%) | 165 (5,1%) | 90 (2,8%) |

1. BEIR - National Academy of Sciences Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation

2. EAC - exposure - age - duration model

3. EAD - exposure - age - concentration model

4. model used in European Pooling Study 5. EPA - Environmental Protection Agency

Despite these recommendations, there were recorded higher concentrations of radon in many countries over the years 1978 - 2015 in several to tens per hundred of houses (7). In 2009, WHO in consultation with EPA launched the first global campaign aimed to raise awareness of the risks resulting from exposure to radon issuing a WHO handbook on indoor radon. The reasons for such action is a possibility of reducing the incidence of lung cancer up to 6 decades of life, both in smokers and non-smokers by as much as 1/3 (4) using construction techniques that reduce the radon indoor concentration such as proper insulation of an installation, soil replacement around the building to remove the source of radon as well as radon removal ventilation of the building (10). The estimated number of avoidable deaths from lung cancer (Tab. II.) When reaching appropriate levels of radon concentrations (L) is 3.7% at L < 148Bq/m³ in the United States (4.2% in the absence of the radon effect); 15.9%, in Germany at L < 100Bq/m³ (7.5% whereas when L < 200Bq/m³

Mimo powyższych rekomendacji, w wielu krajach na przestrzeni lat 1978 – 2015 w kilku do nawet kilkudziesięciu na sto domów notowano stężenia wyższe (7). W 2009 r. WHO w porozumieniu z EPA rozpoczęła pierwszą globalną akcję zmierzającą do podniesienia świadomości zagrożenia wynikającego z ekspozycji na radon, wydając między innymi *WHO handbook on indoor radon*. Uzasadnieniem podjętych działań jest możliwość zmniejszenia zachorowań na raka płuca do 6 dekady życia, zarówno u palących jak i niepalących nawet o 1/3 (4), przy zastosowaniu technik budowlanych służących redukcji stężeń radonu w przestrzeni wewnątrz mieszkalnej takich jak właściwa izolacja instalacji i fundamentów, wymiana gruntu wokół budynku w celu usunięcia źródła radonu oraz systemy wentylacji usuwające radon z budynku (10). Szacunkowa liczba zgonów z powodu raka płuca możliwa do uniknięcia (Tab. II.) przy osiągnięciu odpowiednich poziomów stężeń radonu (P) wynosi: 3,7% przy P < 148Bq/m³ w Stanach Zjednoczonych (4,2% przy braku wpływu radonu); 15,9%, w Niemczech przy P < 100Bq/

and 3.6% when $L < 400 \text{ Bq/m}^3$); 28.4% in Canada at $L < 200 \text{ Bq/m}^3$ (52.3% if the radon concentration would reach the outdoor concentration) (3).

RADON EXPOSURE AND SMOKING

Active smoking is responsible for about 90% of cases of lung cancer (3). Studies have shown a synergistic effect of radon exposure and smoking on a risk of lung cancer (4). According to the EPA lifetime radon exposure to 148 Bq/m^3 will lead to a lung cancer in 7/1000 non-smokers and up to 63/1000 smokers (7). According to other sources, residing in the house with the radon concentration 0, 100 or 800 Bq/m^3 is associated with the risk of dying from lung cancer for non-smoker (at the age of 75) respectively 4, 5 and 10/1000, in comparison to a smoker 100 120, 200/1000 (2), what is approximately 25 - fold increase of risk. The synergistic effect of environmental exposure to radon and passive smoking has been confirmed (6, 9). In a single study, the total radon exposure ($P = 200 \text{ Bq/m}^3$) and passive smoking (1 - 35 years of living with a smoker) in comparison to not exposed to passive smoking were associated with an increased odds ratio of lung cancer risk from $OR = 1:99$ to $OR = 2:75$ (6).

RADON IN POLAND

In Poland, the concentration of radon in buildings range from a dozen to several thousand Bq/m^3 (average of 32 Bq/m^3). Higher risk areas comprise 10% of the country, mainly southern regions (10). Measurements of radon concentration in 2011 involving 129 homes showed the highest radon concentration (845 Bq/m^3) in the Sudety region, and the highest geometric mean (231 Bq/m^3) in the territory of Mazury and Podlasie. Neither of the two major tectonic units in Poland has not been assessed as containing buildings with an average annual radon concentration above 200 Bq/m^3 (11). Another study presenting measurements in 123 residential buildings and 33 schools in Slovakia, Hungary and Poland showed measurements excessive of 300 Bq/m^3 in 13.2% buildings (12). The presence of the geological formations at high risk of radiation in our country showed also measurements from 2013 done in 200 underground tourist routes such as caves, mines and underground structures, where the arithmetic mean was $1,610 \text{ Bq/m}^3$, while the maximum concentration exceeded $20\,000 \text{ Bq/m}^3$ (1). Other studies limited to the Polish cities, residential buildings in Lodz, schools and kindergartens in Kalisz and Ostrowiec reported low concentrations of radon from 29.8 Bq/m^3 to 89 Bq/m^3 (13,14). There was no confirmed high doses of radon exposure in employees and visitors to swimming pools

m^3 (7,5% natomiast gdy $P < 200 \text{ Bq/m}^3$ i 3,6% gdy $P < 400 \text{ Bq/m}^3$); 28,4% w Kanadzie przy $P < 200 \text{ Bq/m}^3$ (52,3 % jeśli stężenie radonu osiągnęłoby poziom w przestrzeni poza pomieszczeniami) (3).

EKSPOZYCJA NA RADON A PALENIE TYTONIU

Aktywne palenie tytoniu odpowiada za około 90% zachorowań na raka płuca (3). Badania wykazały synergistyczny wpływ ekspozycji na radon oraz palenia tytoniu na ryzyko rozwoju raka płuca (4). Według EPA w ciągu całego życia ekspozycja na radon na poziomie do 148 Bq/m^3 spowoduje rozwój raka płuca u 7 / 1000 niepalących i aż 63 / 1000 palących tytoń (7). Według innych źródeł mieszkanie w domu ze stężeniem radonu 0, 100 lub 800 Bq/m^3 jest związane z ryzykiem zgonu z powodu raka płuca dla osoby niepalącej (w wieku 75 lat) odpowiednio 4, 5 i 10 / 1000, porównując do osoby palącej 100, 120, 200 / 1000 (2), co stanowi około 25 - krotny wzrost ryzyka. Potwierdzono również synergistyczny efekt ekspozycji środowiskowej na radon oraz palenia biernego (6,9). W jednym z badań łączna ekspozycja na radon ($P = 200 \text{ Bq/m}^3$) oraz palenie bierne (1 - 35 lat życia z osobą palącą) w stosunku do nienarażonych na palenie bierne wiązała się ze wzrostem ilorazu szans ryzyka raka płuca z $OR = 1:99$ do $OR = 2:75$ (6).

RADON W POLSCE

W Polsce stężenie radonu w budynkach wynosi od kilkunastu do kilku tysięcy Bq/m^3 (średnio 32 Bq/m^3). Obszary podwyższonego ryzyka obejmują 10 % powierzchni kraju, głównie regiony południowe (10). Pomiar stężenia radonu z 2011 r. dotyczące 129 domów wykazały najwyższe stężenia radonu (845 Bq/m^3) w regionie Sude-tów, a najwyższą średnią geometryczną (231 Bq/m^3) na terytorium Mazur i Podlasia. Żadna z dwóch głównych tektonicznych jednostek w Polsce nie została oceniona, jako nie zawierająca budynków ze średnim rocznym stężeniem radonu powyżej 200 Bq/m^3 (11). W kolejnej pracy prezentującej pomiary w 123 budynkach mieszkalnych i 33 szkołach na terenie Słowacji, Węgier i Polski w 13,2 % budynków zanotowano pomiary przekraczające 300 Bq/m^3 (12). Obecność formacji geologicznych z wysokim ryzykiem radiacyjnym w naszym kraju potwierdzają również pomiary z 2013 r. dokonane w 200 podziemnych szlakach turystycznych takich jak jaskinie, kopalnie i podziemne budowle, gdzie średnia arytmetyczna wynosiła 1610 Bq/m^3 , natomiast maksymalne stężenie przekraczało $20\,000 \text{ Bq/m}^3$ (1). Inne badania ograniczone do polskich miast to jest w budynkach mieszkalnych w Łodzi, szkołach oraz przedszkolach w Kaliszu i Ostrowcu donoszą o niskich stężeniach radonu od $29,8 \text{ Bq/m}^3$ do 89 Bq/m^3 (13,14). Nie potwierdzono również narażenia na wysokie dawki wśród pracowników i odwiedzających

with geothermal water containing radon (except 1 of 9 units) in contrast to similar centers in other countries (15).

According to data from 2007 up to 95% exposure to ionizing radiation emitted by isotopes of radon in Poland came from the presence of indoor radon (10). The annual dose of ionizing radiation received by an average Pole from natural and artificial sources of ionizing radiation in 2015 averaged 3.31 mSv (milisiverta). Approximately 36.3% of the radon and its decay products represents 1,201mSv (17). To 2002 in Poland ordinance of the President of the Polish Agency for Atomic Energy (PAA) was in force with the reference level PR = 400 Bq/m³ for buildings prior to 1998 and PR = 200 Bq/m³ for buildings constructed after 1998 (16).

Poland, like other member states of the European Union is obliged to implement until 6 February 2018 a Directive Council of the European Union (2013/59/Euratom) (17). According to the report (PAA) from 2015 works on the new act were scheduled for early 2016 and today are still in progress (17). The Directive obliges Member States to establish national reference levels for indoor radon concentrations both in houses and in workplaces, but not higher than 300 Bq/m³. Moreover, to identify buildings where radon concentration (as an annual average) exceeds the reference level; to encourage, by means of technical and financial resources to implement restrictive measures of radon and the availability of local and national information on the radon indoor exposure as well as related health risks (18).

CONCLUSION

Indoor exposure to radon is a global reach environmental issue. A clear correlation between the dose of exposition and risk of lung cancer creates a possibility of prevention. According to WHO data, published in point. 22 of the Preamble of the European Union Council Directive 2013/59 / Euratom statistically significant increase in incidence is above 100 Bq/m³ (18). The situation in many countries (including Poland) still requires extensive actions in terms of precise legal regulations as well as an increase of public awareness of the role of radon in the epidemiology of lung cancer.

REFERENCES:

1. Olszewski J, Zmyślony M, Wrzesień M, et al. Occurrence of radon in the Polish underground tourist routes. *Med Pr*, 2015; 66(4): 557 – 63.
2. World Health Organization/ WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO; 2009: 1 – 94.

baseny z wodami geotermalnymi zawierającymi radon (poza 1 z 9 jednostek) w przeciwieństwie do podobnych ośrodków w innych krajach (15).

Według danych z 2007 r. aż 95% narażenia na promieniowanie jonizujące emitowane przez izotopy radonu w Polsce pochodziło z obecności radonu w budynkach mieszkalnych (10). Roczna dawka promieniowania jonizującego otrzymywana przez statystycznego Polaka od naturalnych i sztucznych źródeł promieniowania jonizującego w 2015 r. wynosiła średnio 3,31 mSv (milisiverta). Około 36,3% udziału w narażeniu przypada na radon i jego produkty rozpadu to jest 1,201mSv (17). Zgodnie z zarządzeniem *Prezesa Polskiej Agencji Atomistyki* przyjęto poziom referencyjny PR = 400 Bq/m³ dla budynków sprzed 1998 r. oraz PR = 200 Bq/m³ dla budynków po 1998 r. (16). Polska podobnie jak inne kraje członkowskie Unii Europejskiej zobowiązana jest do implementowania do 6 lutego 2018 r. dyrektywy Rady Unii Europejskiej (2013/59/Euratom) (17). Według *Raportu Prezesa Polskiej Agencji Atomistyki* z 2015 r. prace nad nową ustawą zaplanowano na początek 2016 r., na dzień dzisiejszy nadal trwają (17). Dyrektywa zobowiązuje państwa członkowskie do ustanowienia krajowego poziomu referencyjnego dla stężeń radonu w pomieszczeniach oraz miejscach pracy, nie wyższych jednak niż 300 Bq/m³; identyfikowania budynków, w których stężenie radonu (jako średnia roczna) przekracza poziom referencyjny; zachęcania, za pomocą środków technicznych i finansowych do wprowadzania środków ograniczających stężenia radonu oraz zapewnienia dostępności do lokalnych i krajowych informacji o narażeniu na radon w pomieszczeniach jak również związanych z nim zagrożeń dla zdrowia (18).

ZAKOŃCZENIE

Wewnątrzdomowe narażenie na radon stanowi środowiskowy problem o zasięgu globalnym. Wyraźna korelacja pomiędzy dawką ekspozycyjną i ryzykiem raka płuca stwarza potencjalne możliwości prewencji. Według danych WHO, zamieszczonych w pkt. 22 Preambuli Dyrektywy Rady Unii Europejskiej 2013/59/EURATOM statystycznie istotny wzrost zachorowań występuje powyżej 100 Bq/m³ (18). Sytuacja w wielu krajach (w tym również Polsce) w dalszym ciągu wymaga szeroko zakrojonych działań w zakresie precyzyjnych regulacji prawnych oraz zwiększenia świadomości społecznej odnośnie roli radonu w epidemiologii raka płuca.

3. Kim SH, Hwang WJ, Cho JS, et al. Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure. *Ann Occup Environ Med*, 2016; 28;1 - 8.
 4. Lino AR, Abrahao CM, Amarante MP, et al. The role of the implementation of policies for the prevention of exposure to Radon in Brazil - a strategy for controlling the risk of developing lung cancer. *Ecancermedalscience*, 2015; 14; 9: 572.
 5. Noh J, Sohn J, Cho J, et al. Residential radon and environmental burden of disease among nonsmokers. *Ann Occup Environ Med*, 2016; 28; 1 - 12.
 6. Melloni BBM. Lung cancer in never-smokers: radon exposure and environmental tobacco smoke. *Eur Respir J*, 2014; 44(4): 850 - 2.
 7. Yoon JY, Lee JD, Joo SW, et al. Indoor radon exposure and lung cancer: a review of ecological studies. *Ann Occup Environ Med*, 2016; 28; 1 - 15.
 8. Samet JM, Avila-Tang E, Boffetta P, et al. Lung cancer in never smokers: clinical epidemiology and environmental risk factors. *Clin Cancer Res*, 2009; 15; 15(18): 5626-45.
 9. Sheen S, Lee KS, Chung WJ, et al. An updated review of case-control studies of lung cancer and indoor radon - is indoor radon the risk factor for lung cancer. *Ann Occup Environ Med*, 2016; 28:1 - 9.
 10. Korzeniowska - Rejmer E. Radon w gruncie i techniki redukcji jego stężenia w obiektach budowlanych. *CzT* 2008; R. 105, z. 1-Ś: 73 - 88.
 11. Przylibski TA, Zebrowski A, Karpińska M, et al. Mean annual 222 Rn concentration in homes located in different geological regions of Poland - first approach to whole country area *J Environ Radioact*, 2011; 102(8):735 - 41.
 12. Mullerova M, Kozak K, Kovacs T, et al. Indoor radon survey in Visegrad countries. *Appl Radiat Isot*, 2016 Apr; 110: 124 - 8.
 13. Olszewski J, Skubalski J. Radon concentration in selected residential buildings in the city Łódź. *Med Pr* 2011; 62(1): 31 - 6.
 14. Bem H, Bem EM, Krawczyk J, et al. Radon concentration in kindergartens and schools in two cities: Kalisz and Ostrów Wielkopolski in Poland. *J Radional Nucl, Chem*, 2013;295(3): 2229 - 2232.
 15. Walczak K, Olszewski J, Zmysłony M. Estimate of radon exposure in geothermal spas in Poland. *Int j Occup Med Environ Health*, 2016; 29(1): 161-6 strona 161, 164.
 16. Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki zmieniające zarządzenie w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego i wskaźników pochodnych określających zagrożenie promieniowaniem jonizującym z dnia 7 lipca 1995 r. Art.1, pkt. 2
 17. Raport z działalności Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki za 2015 r. 2016
 18. Dyrektywa Rady Unii Europejskiej 2013/59/EU-RATOM ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego z dnia 5 grudnia 2013 r. Preambuła pkt. 22, Art 54, Art 74
- Otrzymano: 7.09.2016 r.
Zaakceptowano do publikacji: 24.11.2016 r.
Received: 7.09.2016
Accepted for publication: 24.11.2016
- Address for correspondence:**
Adres do korespondencji:
lek. Ewa Gawełek
Department of Pathomorphology,
School of Medicine with the Division of Dentistry Medical
University of Silesia, 3 Maja 13-15, 41-800 Zabrze
tel. 509156933
e-mail: ewagawelek@interia.pl