

Wpływ radioaktywnego radonu i jego pochodnych na zdrowie człowieka

The impact of radioactive radon and its decay products on human health

Izabela Bilska

Zakład Jakości Powietrza Zewnętrznego i Wewnętrznego
Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska
Kierownik Zakładu: prof. dr hab. M. Dudzińska
Dyrektor Instytutu: prof. dr hab. L. Pawłowski

STRESZCZENIE

Promieniowanie jonizujące pochodzące od izotopów radonu i ich pochodnych jest odpowiedzialne za ok. 40% dawki rocznej, jaką przyjmuje człowiek ze wszystkich źródeł promieniowania. Są to izotopy alfa-promieniotwórcze, co ma istotne znaczenie w aspekcie szkodliwości dla zdrowia człowieka. W artykule oprócz źródeł przedostawania się radioaktywnego radonu do powietrza w pomieszczeniach, przedstawiono mechanizm powstawania jego pochodnych i sposób oddziaływania tych substancji na zdrowie ludzi. Wymieniono schorzenia, do powstawania i rozwoju których przyczyniają się omawiane substancje oraz przedstawiono przykłady leczniczego ich zastosowania. Aby rozgraniczyć pozytywny i negatywny wpływ radonu na organizm człowieka podano zalecenia organizacji międzynarodowych i normatywy prawne obowiązujące w Polsce i na świecie.

Słowa kluczowe: radon, promieniowanie jonizujące, ryzyko zdrowotne

ABSTRACT

Ionizing radiation derived from radon isotopes and their derivatives is responsible for approx. 40% of the annual dose that every human being takes from all sources of radiation. These are alpha-emitting isotopes, which is important in terms of human health harms. In the article, the sources of radioactive radon entering the air in residential rooms are presented. It also shows the mechanism of forming its derivatives and their impact on human health. Moreover, it provides a list of diseases which these substances can trigger or stimulate and enumerates their medical, beneficial uses. In order to differentiate between positive and negative effects of radon on human body, the article brings together recommendations of international organizations and Polish legal norms.

Key words: radon, ionizing radiation, health risks

WSTĘP

Radon ^{222}Rn i produkty jego rozpadu są szkodliwymi zanieczyszczeniami, naturalnie obecnymi w pomieszczeniach. Nie sam radon, ale produkty jego rozpadu są źródłem wysoko energetycznego promieniowania alfa, które może być szkodliwe dla zdrowia użytkowników pomieszczeń. Dodatkowo, są one stałymi metalami ciężkimi, które mogą łączyć się z cząstkami aerozolowymi obecnymi w powietrzu wewnętrznym, i które mogą być wprowadzane do płuc człowieka poprzez oddychanie [1]. Obecność źródeł promieniowania jonizu-

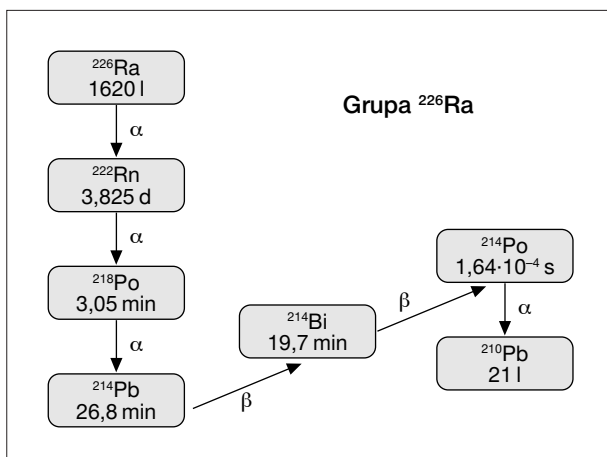
jącego w organizmie może natomiast prowadzić do zmian struktury komórek i niszczenia DNA [2]. Z drugiej jednak strony, od kilku wieków z powodzeniem niewielkie dawki promieniowania jonizującego znajdują zastosowanie w radioterapii, balneologii czy diagnostyce medycznej [3]. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie różnych, często antagonicznych, spojrzeń na radon. Wyniki badań prowadzonych do tej pory nad omawianym pierwiastkiem nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie *Jest on zagrożeniem czy może raczej antidotum?* Dlatego ważna jest dalsza dyskusja w tym temacie.

GENEZA RADONU I POWSTAWANIE JEGO POCHODNYCH W ŚRODOWISKU WEWNĘTRZNYM

Radon jest naturalnie występującym, bezbarwnym i bezwonnym gazem szlachetnym. Pochodzi z rozpadu radu ^{226}Ra – ogniwa w promieniotwórczym szeregu uranowo-radowym, któremu początek daje izotop uranu ^{238}U , obecny w skorupie ziemskiej. Radon ^{222}Rn rozpada się z okresem półtrwania równym 3,8 doby, tworząc szereg krótkożyciowych pochodnych, przy powstawaniu których emitowane są cząstki α i β . Jonizacja przez cząstki α i β ma miejsce już w organizmie człowieka, gdzie radon dostaje się wraz z wdychanym powietrzem. Końcowym produktem kolejnych procesów rozpadu jest stabilny izotop ołowiu ^{206}Pb , który zostaje na trwałe wbudowany w organizm (Ryc. 1).

Z gruntu może przenikać on również do piwnic budynków poprzez szczeliny w podłogach i ścianach, nieszczelności instalacyjne oraz dostawać się do pomieszczeń razem z gazem ziemnym i bieżącą wodą. Dodatkowo dzięki efektowi kominowemu (unoszące się, ogrzane powietrze), radon jest zasysany z piwnic na wyższe kondygnacje budynków (Ryc. 2).

Na wyższych kondygnacjach maleje wpływ radonu docierającego z podłoża, a większego znaczenia nabierają materiały, z jakich wykonane są ściany i stropy budynku oraz rodzaj ich wykończenia. Szczególnie radioaktywne są wszelkie surowce pochodzenia przemysłowego: lotny popiół, żużel, fosfogips i beton. Zawierają one stosunkowo dużo pierwiastków promieniotwórczych, z radem na czele.



Ryc. 1. Szereg krótkożyciowych produktów rozpadu radonu ^{222}Rn z czasami ich połowicznego rozpadu [4]

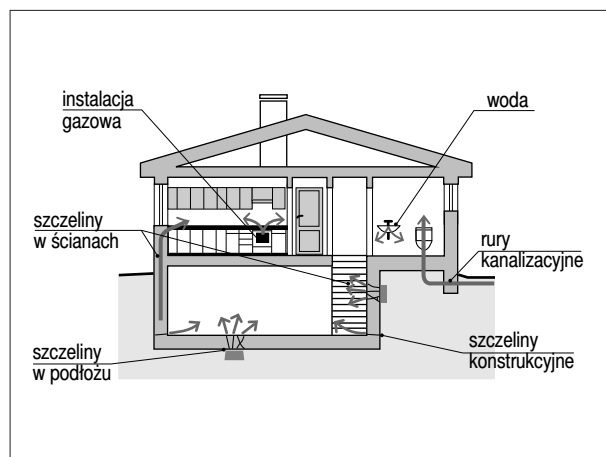
Fig. 1. Short-lived decay products series of radon ^{222}Rn with their half-life times [4]

Średnie stężenie radu w materiałach budowlanych wynosi około 100 Bq/kg [6]. Mniejszą aktywność wykazują drewno, naturalny gips, piasek i żwir. Tempo wydostawania się radonu ze ścian zależy od ich porowatości (umożliwiającej dyfuzję), a także od zastosowanych uszczelnień powierzchniowych. Malowanie, gipsowanie czy tapetowanie może nawet pięciokrotnie zmniejszyć ilość radonu wydzielanego przez przegrody budowlane.

Jako substancja cięższa od powietrza, może gromadzić się we wszelkiego rodzaju kopalniach, szachtach i jaskiniach [7, 8]. Radon przenika również do wód gruntowych oraz cieków wodnych, a stamtąd do atmosfery. Wielkość ekshalacji (wydobywania się) radonu z gruntu zależy od miejsca (rodzaju gleby, geologii podłoża) oraz od warunków atmosferycznych (ciśnienia, siły i kierunku wiatru, wilgotności, obecności pokrywy śnieżnej itp.). Dostają się również do środowiska wskutek przemysłowej działalności człowieka (na przykład podczas wydobywania rud uranu lub spalania węgla zawierającego pierwiastki promieniotwórcze).

WPŁYW POCHODNYCH RADONU NA ZDROWIE CZŁOWIEKA

Dawka pierwiastka, która kumuluje się w płucach, zależy między innymi od stężenia radonu we wdychanym powietrzu, szybkości oddychania, obszaru płuc, w którym cząsteczki są zgromadzone oraz szybkości ich usuwania. To z kolei zależy głównie od średnicy i gęstości cząstek. Istotny jest również fakt iż pochodne radonu nie gromadzą się jed-



Ryc. 2. Drogi wnikania radonu do pomieszczeń [5]

Fig. 2. Entry routes of radon to the living premises [5]

nolicie w układzie oddechowym, a głębokość wniknięcia cząsteczki zależy od jej rozmiarów.

Tak radon, jak i produkty jego rozpadu są wdychane przez człowieka wraz z powietrzem atmosferycznym, dlatego organem wewnętrznym najbardziej narażonym na szkodliwe działanie radonu ^{222}Rn są płuca. Czysty pierwiastek nie stanowi większego zagrożenia, ponieważ jako gaz szlachetny nie wchodzi w reakcje z innymi atomami i nie jest deponowany w układzie oddechowym. Natomiast produkty rozpadu gazowego radonu – izotopy promieniotwórcze, które są ciałami stałymi, osadzają się w pęcherzykach płucnych i emitują cząstki α , już wewnątrz organizmu.

Innym sposobem wnikania produktów rozpadu radonu do płuc jest wdychanie ich wraz z obecnymi w powietrzu pyłami, dymem tytoniowym lub aerozolami, na których się osadzają. Ten aspekt obecności radonu w powietrzu, nabiera większego znaczenia szczególnie w przypadku wyższych stężeń tych substancji w pomieszczeniach przeznaczonych na dłuższy pobyt ludzi.

Pochodne radonu nie deponują się jednolicie w układzie oddechowym – głębokość wnikania cząstek zależy od ich rozmiarów. Aerozole o większych średnicach są odkładane w górnych częściach układu oddechowego, skąd mogą być usunięte w ciągu kilku godzin. Jedynie najmniejsze cząstki (o średnicy poniżej $0,1\ \mu\text{m}$), dostają się do pęcherzyków płucnych. Tam zdeponowane mogą pozostawać miesiącami lub nawet przez kilka lat. Cząsteczki aerozoli o dużej rozpuszczalności są szybko absorbowane z układu oddechowego do krwi, natomiast cząsteczki nierozpuszczalne są deponowane w ściankach pęcherzyków płucnych, a następnie fagocytowane przez leukocyty i przenoszone przez śródbłonek naczyń włosowatych do naczyń limfatycznych, którymi przemieszczane są do węzłów chłonnych. Czas przebywania pochodnych radonu w pęcherzykach płucnych jest najdłuższy, dlatego płuca są najbardziej narażone na ich działanie, w szczególności przy ciągłej, zwiększonej inhalacji radonu. Zawartość pochodnych radonu w powietrzu wewnętrznym jest również określana na podstawie stężenia cząstek aerozolowych i rozkładu ich wielkości z podziałem na klasy [9, 10].

Powstające w międzyczasie cząstki α i β w wyniku zderzeń z elektronami komórek organizmu człowieka, powodują ich jonizację. W rezultacie wzdłuż drogi cząstki powstaje „pas zniszczeń”. Bardzo ważnym rodzajem uszkodzeń są zmiany w DNA, co prowadzi do rozregulowania podstawowych funkcji komórek. Niektóre uszkodzenia mogą być usunięte dzięki działaniu mechanizmów samonaprawczych,

ale pozostałe szkody mogą pociągnąć za sobą groźne dla człowieka skutki i objawić się po latach w postaci raka płuc, a nawet białaczki [11].

Na szczególną uwagę zasługuje deponowany w organizmie stabilny ołów ^{206}Pb . Końcowy produkt szeregu promieniotwórczego uranowo-radowego, obecny w płucach, jest dużym zagrożeniem dla zdrowia. Początkowo odkłada się on w pęcherzykach płucnych, a następnie przechodzi do krwiobiegu człowieka. Po przedostaniu się do krwi ołów łączy się z białkami erytrocytów i w postaci jonowej krąży w organizmie wywołując różnego rodzaju działania toksyczne. Szczególnie niebezpieczne jest to w przypadku większego wchłaniania tego pierwiastka, niż wydalania. Z czasem może to prowadzić do tzw. ołowicy. Objawy kliniczne tej choroby to m.in. bóle głowy, utrata łaknienia, ucisk podsercowy, nadpobudliwość nerwowa, uczucie zmęczenia, czy senność. Jednocześnie pojawia się specyficzny koloryt twarzy zwany „cerą ołowiczą”. Kolejne zmiany wywołane przez ołów prowadzą do uszkodzenia nerek, wątroby, a następnie układu nerwowego. Przy ostrych zatruciach dochodzi bardzo szybko do zgonu [12].

Uznaje się również, że połączenie palenia tytoniu i wysokiego narażenia na radon powoduje znacznie wyższe ryzyko wystąpienia raka płuc u pojedynczej osoby niż każdy z tych czynników z osobna, oraz że palenie tytoniu zwiększa ryzyko wynikające z narażenia na radon na poziomie populacji [13]. Mamy tu więc do czynienia ze zjawiskiem synergii, czyli wzajemnego wzmacniania się działania dwóch szkodliwych czynników. Ryzyko wystąpienia raka płuc u palaczy narażonych na działanie radonu jest ok. 6–10 razy wyższe niż w przypadku osób niepalących [14] (Tab. I). Podobne zjawisko zauważono już wcześniej u palaczy narażonych na wdychanie włókien azbestowych.

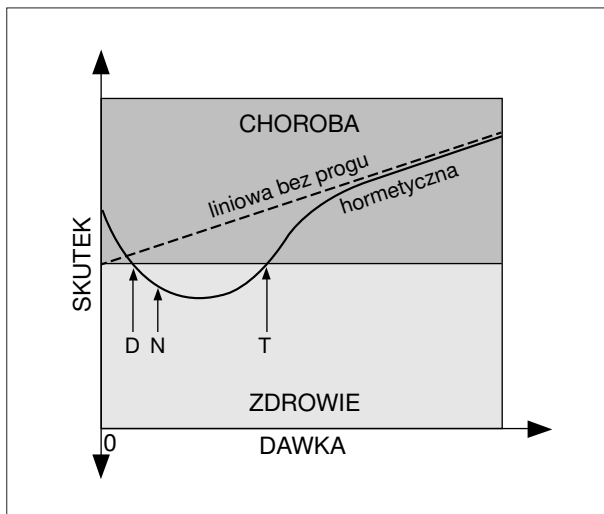
Tabela I. Ryzyko zachorowań na raka płuc w zależności od średniego stężenia radonu w pomieszczeniu mieszkalnym [15].

Table I. The risk of lung cancer depending on the average radon concentration in the residential unit [15].

Średnie stężenie radonu [Bq/m ³]	Ryzyko choroby [%]		
	ogółem	palący	niepalący
20	0,3	1	0,1
100	1,5	5	0,5
200	3	10	1
400	6	20	2

Duże stężenia promieniotwórczego radonu mogą być również przyczyną zwiększonego prawdopodobieństwa zachorowań na choroby cywilizacyjne, w tym przede wszystkim na choroby nowotworowe płuc, górnych dróg oddechowych i białaczki.

Większość badań wskazuje na negatywny wpływ dużych dawek promieniowania jonizującego na organizmy. Dlatego w 1959 r. Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP) przyjęła tzw. hipotezę liniowości. Zakłada ona, że skutki popromienne, tj. mutacje, oraz choroby dziedziczne pojawiające się w wyniku pochłonięcia dużych dawek promieniowania mogą się pojawiać również w przypadku otrzymania małych dawek będących naturalnym tłem w środowisku. Według tej hipotezy zależność skutków od dawki przedstawia linia prosta (Ryc. 3).



Ryc. 3. Zależność biologicznego skutku od dawki promieniowania jonizującego zgodnie z bezprogową hipotezą liniową (linia przerywana) i hipotezą hormetyczną (linia ciągła) [16].

Fig. 3. The dependence of the biological effect of the dose of ionizing radiation in accordance with a linear-threshold hypothesis (dashed line) and the hormetic hypothesis (solid line) [16].

Istnieje również przeciwna do teorii liniowości, teoria hormezy radiacyjnej, która opiera się na założeniu, że osoby, które otrzymały niewielkie dawki promieniowania, znoszą lepiej duże dawki otrzymane w późniejszym czasie. Badania te dowodzą, że u ludzi stymulowanych działaniem niewielkich dawek promieniowania jonizującego występuje mniejsze prawdopodobieństwo zachorowania na złośliwe odmiany raka. Ponadto działając promieniami jonizującymi na organizm można doprowadzić do na-

prawy uszkodzonego DNA. Wywiera to korzystny wpływ na choroby uwarunkowane genetycznie, zmniejszając prawdopodobieństwo ich pojawiania się [16]. Deficyt czynnika – dawka promieniowania mniejsza od D – powoduje objawy niedoboru. Małe dawki – pomiędzy D i T – poprawiają stan zdrowia. Dawki większe od T powodują skutki szkodliwe dla zdrowia. N oznacza średnią dawkę pochodzącą od promieniowania naturalnego. Punkty D, T i N reprezentują wartości szacunkowe [17].

Pomimo iż alfaterapia ma szeroki zakres działania, nadal wzbudza kontrowersje. Słusznym więc wydaje się być rozdzielenie wpływu wysokich i niskich dawek promieniowania jonizującego na człowieka. Prowadzone do tej pory badania wykazują, że przy dawkach poniżej 100 mSv aktywowane są mechanizmy obronne, tak że komórki uszkodzone wskutek wszystkich przyczyn są eliminowane lub naprawiane przez procesy o wysokiej efektywności [19]. Skuteczność pobudzania tych procesów obronnych rośnie wraz z dawką, tak że w zakresie kilkunastu i kilkudziesięciu milisiwertów może wystąpić efekt dormezy – redukcja uszkodzeń komórki wywołanych procesami metabolicznymi ma wówczas znacznie większą rolę niż możliwe niedoskonałości w procesach naprawczych. Przy dawkach powyżej 100–200 mSv, koncentracja uszkodzonych komórek rośnie i procesy naprawcze DNA mogą przebiegać z błędami, których prawdopodobieństwo rośnie wraz z mocą dawki. Błędy w naprawie DNA mogą prowadzić do przeżycia komórek uszkodzonych i zapoczątkowania nowotworu. Przy dawce powyżej 500 mSv tempo rozmnażania się komórek rośnie, by zrekompensować utratę komórek uszkodzonych przez promieniowanie. Szybkie dzielenie się komórek przeszkadza wówczas w procesach naprawczych i rośnie prawdopodobieństwo błędnej naprawy i rozwoju nowotworu [20].

PROZDROWOTNE WŁAŚCIWOŚCI BALNEOLOGICZNE

Poparcie dla hipotezy hormezy odnaleźć można w wykorzystaniu wód bogatych w radon. Ich działanie opiera się na teorii zakładającej, że niewielkie dawki promieniowania pobudzają procesy naprawcze ludzkiego DNA.

Wody radonowe, czyli takie, które wykazują aktywność co najmniej $74 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, mogą być stosowane w celach leczniczych i balneologicznych [18]. Badania wskazują, że radon oddziałuje korzystnie na człowieka w przypadku niewydolności wieńcowej, dychawicy oskrzelowej pierwotnej, a także

w zaburzeniach okresu przekwitania u kobiet, a nawet niepłodności męskiej [3]. Dotychczasowa wiedza na ten temat jest jednak niewielka i trudno tu określić odpowiednie dawki, czy metody postępowania przy użyciu radonu do celów leczniczych.

Radon wywiera korzystny wpływ na schorzenia układu ruchu, dychawicę oskrzelową, a także zwiększa odporność organizmu. Oddziaływanie radonu na ścianę naczyń powoduje ich rozszerzenie, co obniża ciśnienie tętnicze krwi i zwiększa ukrwienie wielu narządów.

Radon wchłania się szybko do dróg oddechowych, gromadzi się w gruczołach wewnętrznego wydzielania oraz w ścianie naczyń, a emitowane przez niego promieniowanie alfa zwiększa wydzielanie wielu hormonów takich jak kortyzon, tyreotropowy przysadki, testosteron czy hormon tarczycy.

Korzystne działanie radonu zostało potwierdzone w badaniach doświadczalnych i w leczeniu chorych. Nie wywołuje on skutków ubocznych.

W balneoterapii wody z zawartością radonu są stosowane są w kąpielach leczniczych (w wannach i basenach rehabilitacyjnych), a także w kuracjach pitnych i inhalacjach. Według współczesnych badań radon pobudza korę nadnerczy do wydzielania hormonów steroidowych, działa więc przeciwbólowo, przeciwzapalnie i odczulająco. Poprawia przepływ krwi przez tkanki, dzięki czemu zwiększa wydolność organizmu i tolerancję na wysiłek. Zwiększa przepływ krwi przez nerki, dzięki czemu przyczynia się do poprawy diurezy. Powoduje wzrost wydzielania testosteronu i pozytywnie wpływa na płodność u mężczyzn. Pozytywnie wpływa na leczenie zmian zwyrodnieniowych stawów, kręgosłupa, w reumatoidalnym zapaleniu stawów, w stanach po urazach i złamaniach. Radon wykazuje długotrwały efekt przeciwbólowy, utrzymujący się nawet do 12 miesięcy po zakończeniu kuracji [21]. Zaobserwowano pozytywne działanie terapii radonem na układ nerwowy i mięśniowy. Najlepsze wyniki uzyskano w grupie przyjmującej kąpiele i inhalacje z wyższą zawartością radonu.

Radon stanowi czynnik uzupełniający leczenie między innymi: chorób układu krążenia, układu oddechowego, nadciśnienia samoistnego, alergii, schorzeń narządów ruchu, dolegliwości wywołanych cukrzycą, chorób kobiecych, bezpłodności, impotencji. Łagodzi kłopoty związane z menopauzą, przywraca właściwe funkcjonowanie systemu nerwowego. Dziesięciolecia badań lekarskich ustaliły, że zasadnicze wskazania do radonbalneologii istnieją w przypadku: choroby Bechterewa, choroby zwyrodnieniowej stawów obwodowych, choroby zwyrodnieniowej stawów kręgosłupa, reumatyzm

tkanek miękkich, niedoczynność jajników, zaburzenia obwodowego krążenia tętniczego, chorób dróg oddechowych, choroby reumatyczne, choroby krążenia. Inhalacje nie są jednak polecane w przypadku: chorób nowotworowych, niewydolności krążenia, klaustrofobii, inwalidztwa ruchowego, chorób psychicznych, padaczki oraz napadów omdleń. Radon bardzo korzystnie wpływa także na zdrowy organizm – wzmacnia jego naturalną odporność.

Obecnie radon jest wykorzystywany do celów leczniczych w 8 lokalizacjach w Polsce, głównie w rejonie Sudetów. Stosuje się go w postaci kąpeli radonowych i inhalacji. W Kowarach stosowana jest tzw. skojarzona terapia radonowa, która łączy inhalacje i ćwiczenia w basenie z ciepłą wodą.

REGULACJE PRAWNE

Rozgraniczenia pomiędzy korzystną i niekorzystną ilością radonu w naszym otoczeniu nie ułatwiają nam regulacje prawne. Aktualnie brak jest normatywów odnośnie koncentracji radonu w pomieszczeniach. Pomocniczo może posłużyć jedynie zarządzenie, które dopuszcza maksymalne stężenie radonu w budynkach powstałych przed 1998 r. równe $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ oraz koncentrację $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ dla nowszych budynków [22]. Światowa Organizacja Zdrowia zaleca nieprzekraczalnie poziomu $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, a Unia Europejska $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ [13, 23]. Regulacje dotyczące promieniowania naturalnego wprowadza także rozporządzenie [24], które reglamentuje koncentrację radu ^{226}Ra do poziomu $200 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla materiałów budowlanych stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi lub inwentarza żywego oraz $400 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla odpadów przemysłowych stosowanych na terenie zabudowanym oraz $1000 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla odpadów przemysłowych stosowanych na innych terenach. Ustalone w ten sposób limity stanowią relatywnie wysokie poziomy, trudne do przekroczenia na większości powierzchni naszego kraju.

Warto zatem zmierzyć, chociażby okazjonalnie, poziom koncentracji cząstek radonu w powietrzu wewnętrznym, i porównać z obowiązującymi nas wytycznymi. Przy stężeniach przekraczających zalecane poziomy pamiętajmy, że w redukcji stężenia radonu mogą pomóc już tak proste zabiegi jak wietrzenie pomieszczeń czy uszczelnianie wszelkiego rodzaju szczelin i pęknięć w piwnicach [25]. Radon jest emitowany również przez wyroby zawierające farbę radową – zegary, zegarki i mierniki dlatego warto zrezygnować z używania starych, potencjalnie niebezpiecznych sprzętów.

WNIOSKI

Liczne badania potwierdzają pozytywne działanie kuracji radonem w leczeniu schorzeń narządów ruchu w zastosowaniu balneologicznym. Ma on działanie przeciwbólowe i przeciwzapalne, poprawia transport tlenu w komórkach, normalizuje działanie ośrodkowego układu nerwowego. Nie ma jednak badań potwierdzających całkowite bezpieczeństwo stosowania radonu. Brak jest również ujednoczonych standardów i dokładnych wytycznych dotyczących jego dawkowania. Nieliczne regulacje, dotyczące zawartości radonu w materiałach budowlanych, nie stanowią punktu odniesienia w aspekcie wpływu na zdrowie człowieka.

Mimo wielu zagrożeń, jakie niesie z sobą stosowanie substancji promieniotwórczych, liczne korzyści osiągnięte w radonoterapii sprawiają, że jest ona chętnie stosowaną metodą leczenia schorzeń wielu narządów. Szczególnie przyczynia się do tego jej potwierdzony pozytywny, długoterminowy wpływ przeciwbólowy oraz możliwość ograniczenia stosowanych środków farmakologicznych.

LITERATURA

- [1] Forkapić S., Mrda D., Vesković M. i wsp.: Radon equilibrium measurement in the air. *Romanian Journal of Physics* 2013; 58: 140-147.
- [2] United States Environmental Protection Agency: Radiation: facts, risks, and realities. 2012; dostęp: <http://www.epa.gov/radiation/docs/402-k-10-008.pdf>
- [3] Dadel M., Trościanko-Wilk E.: Wybrane przykłady zastosowania radonoterapii w leczeniu schorzeń narządu ruchu w literaturze polskiej i zagranicznej (lata 1950-2013). *Acta Balneologica* tom LVI Nr 1 2014; 135: 46-50.
- [4] Fuks L., Mamont-Cieśla K., Kusyk M.: Badania polskich węgla aktywnych przeznaczonych do sorpcji i detekcji radonu. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa 2000.
- [5] Kozak K., Śmiałek A.: Radon – jak się przed nim chronić. *Murator* 2009; 12: 109-113.
- [6] Zak A., Biernacka M., Lipiński P. i wsp.: The results of measurements of building materials in Poland in the context of the indoor ²²²Rn concentration limitation. *Science of the Total Environment* 2009; 272: 1-3.
- [7] Dudzińska M. R., Południk B., Grządziel D. i wsp.: Radon exposure in premises in the Lublin region, eastern Poland. In: 10th International Conference Healthy Buildings, 8-12 July, Brisbane, Australia 2012.
- [8] Fijalkowska-Lichwa L.: Short-term radon activity concentration changes along the Underground Educational Tourist Route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts., SW Poland). *Journal of Environmental Activity* 2014; 135: 25-35
- [9] Mostafa A.M.A., Tamaki K., Moriizumi J. i wsp.: The weather dependence of particle size distribution of indoor radioactive aerosol associated with radon decay products. *Radiation Protection Dosimetry* 2011; 146(1-3): 19-22.
- [10] Bilka I., Południk B. i Dudzińska M.R.: Parametry powietrza wewnętrznego a stężenie radonu w klimatyzowanym pomieszczeniu dydaktycznym. (w:) Dudzińska M., Pawłowski A. (red.): *Polska Inżynieria Środowiska: prace. T. 1*, Politechnika Lubelska, Lublin 2012: 79-87.
- [11] Mnich Z., Karpińska M., Kapała J. i wsp.: Radon concentration in hospital buildings erected during the last 40 years in Białystok, Poland. *Journal of Environmental Radioactivity* 2004; 75: 225-232.
- [12] Dumieński M.: Narażenie na ołów. Broszura dla pracowników wykonujących pracę w narażeniu na ołów. Fundacja na rzecz dzieci „Miasteczko Śląskie”, Miasteczko Śląskie 2008.
- [13] World Health Organization: WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants. WHO Regional Office for Europe, Bonn 2010.
- [14] Adamczyk-Lorenc A.: Tło hydrogeochemiczne radonu w wodach podziemnych Sudetów. Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007.
- [15] The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Raport Komitetu Naukowego ONZ-UNSCEAR, 1993.
- [16] Jaworowski Z.: Dobroczynne promieniowanie. *Wiedza i życie* 1997; 3: 34-35.
- [17] Przylibski T. A., Olszewski J.: Oddziaływanie radonu na organizm człowieka. (w:) Radon w środowisku życia, pracy i nauki mieszkańców Dolnego Śląska. Polski Klub Ekologiczny, Okręg Dolnośląski, Wrocław 2006.
- [18] Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze. *Dz U* 2011 nr 163 poz. 981.
- [19] Academie des Sciences – Academie Nationale de Medecine: Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation. 2005.
- [20] Pollycove M., Feinendegen L.: Radiation-included versus endogenous DNA damage: possible effects of inducible protective responses in mitigating endogenous damage. *Hum Exp Toxicol* 2003; 22: 290-306.
- [21] Franke A., Reiner L., Resch K. L.: Long-term benefit of radon spa therapy in the rehabilitation of rheumatoid arthritis: a randomized, double-blinded trial. *Rheumatol Int* 2007; 27(8): 703-713.
- [22] Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 7 lipca 1995 r. zmieniające zarządzenie w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego i wskaźników pochodnych określających zagrożenie promieniowaniem jonizującym. *Monitor Polski* 1995 nr 35 poz. 419.
- [23] Dyrektywa Rady 2013/59/EURATOM z dn. 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego.
- [24] Rozporządzenie Rady Ministrów z 2 stycznia 2007 r. w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów. *Dz U* 2007 nr 4 poz. 29.
- [25] Kozak K., Grządziel D., Południk B. i wsp.: Air conditioning impact on the dynamics of radon and its daughters concentration. *Radiation Protection Dosimetry* 4 2014; 162: 663-673.

Adres do korespondencji:

Izabela Bilka

Zakład Jakości Powietrza Zewnętrznego i Wewnętrznego

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska

Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin

tel.: (81) 538 44 03, e-mail: i.bilka@pollub.pl