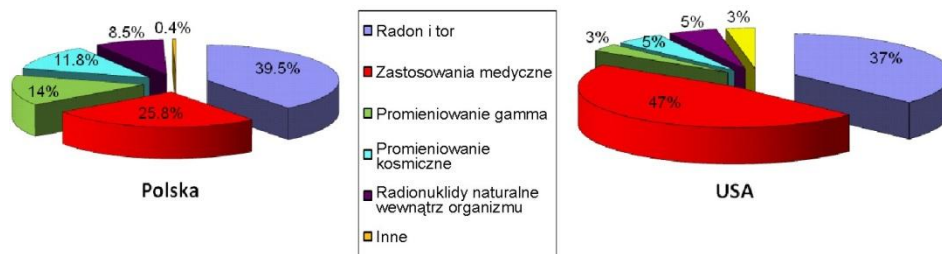




Promieniowanie naturalne z Ziemi i z Kosmosu

*Paweł Moskal, Sedigheh Jowzaee
Instytut Fizyki UJ*

Organizmy żyjące na powierzchni Ziemi podlegają nieustannemu napromienianiu cząstkami pochodzącymi z Kosmosu, a także tymi z rozpadów jąder atomów stanowiących skorupę Ziemi i jej atmosferę. Źródłem napromieniania istot żywych są także pierwiastki promieniotwórcze zawarte w ich organizmach.



Rys. 1. Przyczynki procentowe napromieniania człowieka pochodzące ze źródeł naturalnych i sztucznych. Jednostką dawki napromieniania organizmu jest Sv (Siwert)¹. Średnia roczna dawka napromieniania w Polsce wynosi 3,3 mSv, w tym od źródeł naturalnych ~2,45 mSv, a od sztucznych ~0,85. W USA całkowita średnia dawka roczna jest prawie dwa razy większa niż w Polsce i wynosi 6,2 mSv, a procentowy przyczynek od źródeł sztucznych jest także istotnie wyższy. Wynika to z faktu, że w USA medycyna nuklearna jest znacznie powszechniej stosowana niż w Polsce

Promieniowanie z Kosmosu

Promieniowanie kosmiczne w postaci protonów (87%), jąder helu (11%), a także nieznacznie w postaci innych jąder (1%) i elektronów (1%) dolatuje do atmosfery Ziemi w większości spoza układu Słonecznego, z odległych galaktyk. Część tego pierwotnego promieniowania dociera do powierzchni Ziemi. Pozostała część inicjuje w atmosferze i zawartych w niej pyłach reakcje jądrowe rozbijając jądra atomowe na mniejsze fragmenty, a także wytwarzając, nieraz w wielu następujących po sobie reakcjach, wiele innych cząstek. Spośród wytwarzanych w atmosferze cząstek najistotniejszymi, z punktu widzenia promieniowania

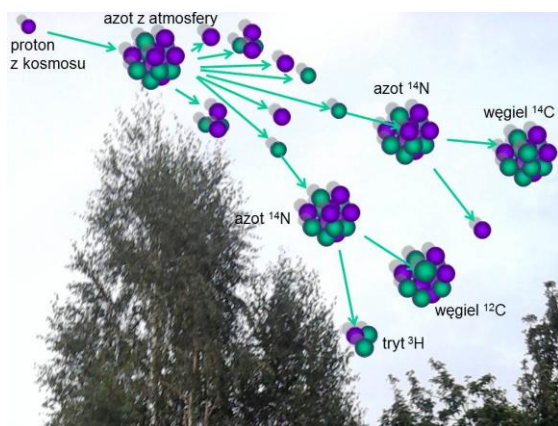
¹ Przypominamy, że $Sv = J/kg$ jest miarą napromieniania organizmu wyrażaną w jednostkach energii deponowanej w organizmie przez promieniowanie na jednostkę masy napromienianego organizmu. Sv (siwert) jest jednostką dawki skutecznej będącej miarą skutków biologicznych wywołanych w organizmach żywych przez promieniowanie. Dawkę tę oblicza się przemnażając energię kinetyczną zdeponowaną przez promieniowanie na jednostkę masy organizmu przez współczynnik szkodliwości danego rodzaju promieniowania oraz przez współczynnik wagowy uwzględniający wrażliwość na promieniowanie poszczególnych organów.

powierzchni Ziemi, są miony (mion jest cząstką o właściwościach podobnych do elektronu, tylko posiada ponad dwieście razy większą masę niż elektron). W sumie, na skutek pierwotnego i wtórnego promieniowania kosmicznego, w trakcie jednej sekundy przez każdego człowieka przelatuje około siedemdziesiąt mionów, pięćdziesiąt kwantów gamma, kilkadziesiąt elektronów i antyelektronów i kilka protonów i neutronów. W ciągu każdej sekundy przelatuje przez człowieka także wiele miliardów neutrin docierających do Ziemi z Kosmosu. Pomimo tak olbrzymiej liczby ich wpływ na nasze organizmy możemy całkowicie zaniedbać, ponieważ neutrina nie oddziałują ani elektromagnetycznie, ani silnie. Dlatego też średnio tylko raz na kilka dni zdarza się w ciele człowieka reakcja wywołana przez neutrino.

Pozostałe cząstki, takie jak miony, protony czy elektrony posiadające ładunek elektryczny, przelatując przez organizm jonizują na swojej drodze atomy. Jonizację pośrednio mogą wywołać także elektrycznie obojętne neutrony lub kwanty gamma: neutrony na skutek reakcji jądrowych, w których uwalniane są cząstki naładowane, a kwanty gamma poprzez elektromagnetyczne wybijanie elektronów. W sumie promieniowanie kosmiczne w ciągu roku wywołuje jonizację zawartych w człowieku atomów, a tym samym uszkodzenia komórek, wynoszące średnio około 0,39 mSv. Na terenie Polski napromieniowanie człowieka bezpośrednio w wyniku promieniowania kosmicznego stanowi jedynie 11,8% całkowitej dawki, wynoszącej 3,3 mSv na rok (rys. 1).

Substancje promieniotwórcze wytwarzane w atmosferze

Promieniowanie kosmiczne prowadzi także do powstania izotopów promieniotwórczych, które napromieniowują nas od wewnątrz. Izotopy te wytwarzane są w atmosferze Ziemi w wyniku łańcuchów reakcji jądrowych inicjowanych przez pierwotne promieniowanie kosmiczne (rys. 2). Do takich kosmopochodnych izotopów mających znaczący przyczynek do napromieniowania żywych organizmów należą jądra promieniotwórcze węgla ^{14}C , sodu ^{22}Na , wodoru ^3H i berylu ^9Be .



Rys. 2. Łańcuch reakcji jądrowych inicjowany promieniowaniem kosmicznym prowadzący do powstania izotopów węgla ^{14}C i wodoru ^3H . Zarówno ^{14}C jak i ^3H powstaje głównie w wyniku oddziaływań neutronów promieniowania kosmicznego z azotem i tlenem.

Jądro atomowe wodoru ^3H podobnie jak ^{14}C powstaje w reakcji neutronów termicznych z jądrami azotu, na przykład w wyniku reakcji: $n + ^{14}\text{N} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^3\text{H}$ i $n + ^{14}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{C} + p$. W wyniku reakcji jądrowych indukowanych promieniowaniem kosmicznym koncentracja węgla ^{14}C w węglu wynosi 10^{-12} , a trytu (^3H) w wodrze 10^{-18} .

Atomy z jądrami promieniotwórczymi posiadają praktycznie takie same właściwości chemiczne jak zwykłe atomy, dlatego zużywane są w procesach metabolicznych przez organizmy żywe podobnie jak atomy z jądrami stabilnymi. Przykładowo wdychamy znajdujący się w powietrzu promieniotwórczy dwutlenek węgla $^{14}\text{CO}_2$ czy molekuly promieniotwórczej pary wodnej $^3\text{H}_2\text{O}$. W konsekwencji atomy z jądrami promieniotwórczymi, takimi jak na przykład ^{14}C czy ^3H , stanowią część naszych organizmów.

Promieniowanie z wnętrza człowieka

Największy wkład do wewnętrznego napromieniowania pochodzi od promieniotwórczego potasu ^{40}K , który nie powstaje na skutek promieniowania kosmicznego, lecz jest jednym z 18 pierwiastków promieniotwórczych występujących w skorupie Ziemi, których czas życia jest większy lub niewiele mniejszy niż wiek Ziemi (około pięć miliardów lat). Potas ^{40}K występuje powszechnie w żywności i w konsekwencji wchłaniany drogą pokarmową stanowi składnik organizmu człowieka.

Biorąc pod uwagę stosunkową zawartość promieniotwórczego potasu ^{40}K w potasie (około 10^{-4}), węgla ^{14}C w węglu (około 10^{-12}), zawartość tych pierwiastków w organizmie człowieka (~18% masy człowieka to węgiel, a 0,2% to potas) oraz średnie czasy życia pojedynczych jąder $\sim 1,85 \cdot 10^9$ lat (^{40}K) i ~ 8500 lat (^{14}C) otrzymujemy², że w człowieku o masie 70 kg na sekundę rozpada się około 4300 jąder potasu ^{40}K i około 2500 jąder węgla ^{14}C . Biorąc pod uwagę także inne pierwiastki promieniotwórcze okazuje się, że średnio w trakcie jednej sekundy w człowieku następuje około 8000 rozpadów promieniotwórczych, w wyniku których człowiek od wewnątrz napromieniowuje się głównie elektronami i kwantami gamma. Dawka napromieniowania wynikająca z rozpadów radionuklidów zawartych w ciele człowieka wynosi około 0,28 mSv, co w Polsce stanowi 8,5% całkowitej dawki rocznej (rys. 1).

² Aktywność potasu ^{40}K w człowieku możemy obliczyć dzieląc liczbę jąder atomowych ^{40}K znajdujących się w człowieku przez średni czas życia jednego jądra. Aby to zrobić musimy wiedzieć, że:

średni czas życia jądra ^{40}K wynosi 1,85 miliarda lat $\sim 58,2 \cdot 10^{15}$ sekund;

zawartość procentowa potasu w człowieku wynosi 0,2% = 0,002;

zawartość stosunkowa potasu ^{40}K do potasu naturalnego (stabilnego) wynosi 0,000117;

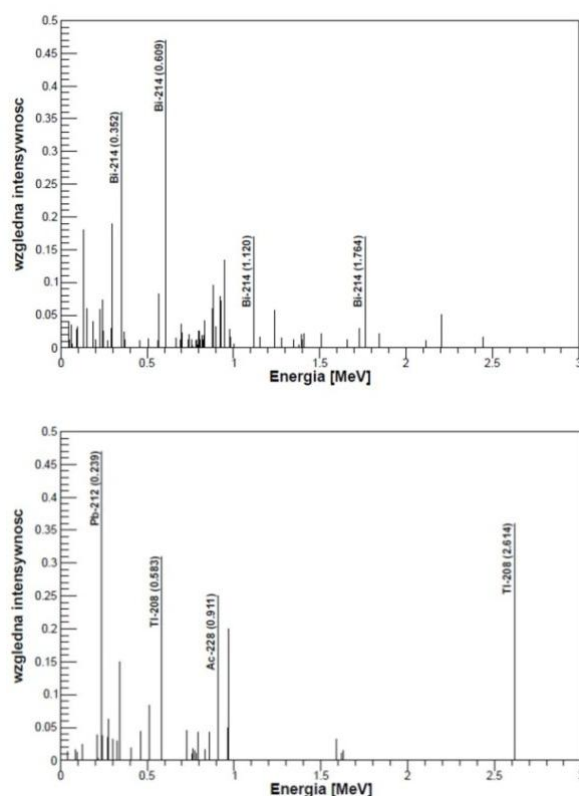
masa molowa potasu wynosi $\sim 39,1$ grama, czyli $6,02 \cdot 10^{23} / 39,1 = 154 \cdot 10^{20}$ atomów na gram.

Biorąc pod uwagę powyższe wartości dla człowieka o masie 70 kg otrzymujemy:

$70 \text{ kg} \cdot 0,002 \cdot 0,000117 \cdot 154 \cdot 10^{23} \text{ kg}^{-1} / (58,2 \cdot 10^{15} \text{ s}) = 4334$ rozpady potasu ^{40}K na sekundę.

Promieniowanie z Ziemi

Spośród 18 długożyjących pierwiastków promieniotwórczych znajdujących się w skorupie Ziemi tylko uran (^{238}U , ^{235}U) i tor (^{232}Th), inicjując szereg następujących po sobie rozpadów, powodują, że w skorupie Ziemi znajdują się jeszcze 43 inne promieniotwórcze izotopy. Czas życia tych pochodnych izotopów jest o wiele rzędów wielkości mniejszy niż wiek Ziemi, więc można by w uproszczeniu przyjąć, że są one „na bieżąco” wytwarzane i w związku z tym ich aktywność jest taka sama jak aktywność protoplastów inicjujących łańcuch rozpadów. Przykładowo na jeden rozpad ^{238}U mamy po jednym rozpadzie każdego z pierwiastków z szeregu³ (patrz tabele 1 i 2).



Rys. 3. Widmo energii kwantów gamma emitowanych z rozpadu izotopów w szeregu uranowo-radowym (górny wykres) oraz torowym (dolny wykres); patrz także tabele 1 i 2. Na wykresie zaznaczone są wszystkie wartości energii emitowanych kwantów w poszczególnych szeregach. Intensywność podana jest w stosunku do aktywności prekursora szeregu

³ Mniejszą aktywność będą miały pochodne nuklidów rozpadających się na dwa lub więcej sposobów.

Izotopy promieniotwórcze znajdujące się w skorupie Ziemi napromieniowują żyjące na powierzchni Ziemi organizmy głównie poprzez promieniowanie gamma, ponieważ promienie beta i alfa są w większości pochłaniane zanim wydosną się na powierzchnię. Największy wkład do promieniowania gamma pochodzącego z Ziemi mają izotopy z szeregów promieniotwórczych uranu i toru (65%) oraz potas ^{40}K (35%). W Polsce powodują one dawkę wynoszącą 0,462 mSv co stanowi 14% całkowitej dawki napromieniowania (rys. 1). Energia kwantów gamma emitowanych w wyniku rozpadu potasu wynosi 1461 keV, a izotopy z szeregu ^{238}U i ^{232}Th emitują kwanty gamma o energiach od kilku keV do ~3300 keV. Widma promieniowania gamma z szeregu torowego (^{232}Th) oraz uranowo-radowego (^{238}U) pokazane są na rys. 3. Na widmach tym widać wiele linii zarówno dla szeregu uranowo-radowego jak i dla szeregu torowego, jednak emisja większości z nich jest mało prawdopodobna. W tabelach 1 i 2 dane są energie kwantów gamma dla najbardziej intensywnych przejść po rozpadzie danego izotopu.

Tabela 1. Szereg torowy ^{232}Th . Przedstawiono łańcuch rozpadów: $\text{Th} \rightarrow \text{Ra} \rightarrow \text{Ac} \rightarrow \text{Th} \rightarrow \text{Ra} \rightarrow \text{Rn} \rightarrow \text{Po} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Bi} \rightarrow (\text{Po}, \text{Tl}) \rightarrow \text{Pb}$. Podane są energie kwantów gamma emitowanych tylko z największą intensywnością

Izotop	Czas połowicznego zaniku	Rozpady o największej intensywności*					
		alfa		beta		gamma	
		E	I	E	I	E	I
^{232}Th	$1,39 \cdot 10^{10}$ y	3,95	(24%)	–	–	–	–
		4,01	(76%)	–	–	–	–
^{228}Ra	5,75 y	–	–	0,055	(100%)	–	–
^{228}Ac	6,13 h	–	–	2,11	(100%)	0,34	(15%)
		–	–	–	–	0,908	(25%)
		–	–	–	–	0,968	(20%)
^{228}Th	1,913 y	5,34	(28%)	–	–	0,084	(1,6%)
		5,42	(71%)	–	–	0,214	(0,3%)
^{224}Ra	3,64 d	5,45	(5,5%)	–	–	0,241	(3,7%)
		5,68	(94,5%)	–	–	–	–
^{220}Rn	55,6 s	6,30	(~100%)	–	–	0,55	(0,07%)
^{216}Po	0,145 s	6,78	(100%)	–	–	–	–
^{212}Pb	10,64 h	–	–	0,580	–	0,239	(47%)
		–	–	–	–	0,300	(3,2%)
^{212}Bi	60,5 m	6,05	(70%)	2,25	(100%)	0,040	(2%)
		6,09	(30%)	–	–	0,727	(7%)
		–	–	–	–	1,620	(1,8%)
^{212}Po	–	–	–	–	–	–	–
		–	–	–	–	–	–
		–	–	1,80	(100%)	0,511	(23%)
		–	–	–	–	0,583	(86%)
		–	–	–	–	2,614	(100%)
^{208}Pb	Stabilny	–	–	–	–	–	–

* Względna intensywność dotyczy rozpadów danego izotopu a nie prekursora szeregu.

Tabela 2. Szereg uranowo-radowy ^{238}U . Przedstawiono łańcuch rozpadów: $\text{U} \rightarrow \text{Th} \rightarrow \text{Pa} \rightarrow (\text{Pa}, \text{U}) \rightarrow \text{Th} \rightarrow \text{Ra} \rightarrow \text{Rn} \rightarrow \text{Po} \rightarrow (\text{Pb}, \text{At}) \rightarrow \text{Bi} \rightarrow (\text{Po}, \text{Tl}) \rightarrow \text{Pb}$. Podane są energie kwantów gamma emitowanych tylko z największą intensywnością

Izotop	Czas połowicznego zaniku	Rozpady o największej intensywności* Energia „E” cząstek podana jest w [MeV], a intensywność „I” podana jest w procentach					
		alfa		beta		gamma	
		E	I	E	I	E	I
^{238}U	$4,468 \cdot 10^9$ y	4,15 4,19	(24%) (76%)	–		–	
^{234}Th	24,1 d	–		~ 0,103 0,191	(19%) (81%)	0,063 0,924 0,928	(3,5%) (2,81%) (2,77%)
$^{234\text{m}}\text{Pa}$ ↙ 99,86% ↘ ↘ 0,14%	1,18 m	–		2,29	(98%)	0,569 0,883 0,946	(8,2%) (9,6%) (13,4%)
– ^{234}Pa	6,7 h	–		0,53 1,13	(66%) (13%)	0,10 0,131 0,946	(50%) (18%) (13,4%)
^{234}U	$2,48 \cdot 10^5$ y	4,72 4,77	(28%) (72%)	–		0,053	(0,2%)
^{230}Th	$7,52 \cdot 10^4$ y	4,62 4,68	(24%) (76%)	–		0,068 0,142	(0,6%) (0,07%)
^{226}Ra	1602 y,	4,60 4,78	(5,5%) (94,5%)	–		0,186	(4%)
^{222}Rn	3,825 d,	5,49	(~100%)	–		0,510	(0,07%)
^{218}Po ↙ 99,98% ↘ ↘ 0,02%	3,05 m	6,11	(100%)	0,33	(100%)	–	
^{214}Pb	–	–	–	1,03	(6%)	0,241 0,295 0,352	(7,3%) (19%) (36%)
– ^{218}At	2 s	6,65 6,70	(6%) (94%)	0,67	(94%)	–	
^{214}Bi ↙ 99,96% ↘ ↘ 0,04%	19,7 m	5,61	(100%)	3,26	(100%)	0,609 1,120 1,764	(47%) (17%) (17%)
^{214}Po	–	–	–	–	–	0,799	(0,014%)
– ^{210}Tl	1,32 m	–		2,3	(100%)	0,296 0,795 1,07 1,31	(80%) (100%) (17%) (21%)
^{210}Pb	~22 y	3,7	($1,8 \cdot 10^{-8}$)	0,017 0,064	(85%) (15%)	0,047	(4%)
^{210}Bi ↙ ~100% ↘ ↘ ~,00001%	5,02 d	4,93 4,89 4,59	(60%) (34%) (5%)	1,155	(100%)	–	
^{210}Po	–	–	–	–	–	0,803	(0,0011%)
– ^{206}Tl	4,19 m	–		1,520	(100%)	–	
^{206}Pb	Stable	–		–		–	

* Względna intensywność dotyczy rozpadów danego izotopu, a nie prekursora szeregu.

Z jakiej głębokości docierają kwanty gamma?

Przelatując przez materię kwanty gamma ulegają pochłanianiu lub rozproszeniu na elektronach i w efekcie tych reakcji ich strumień zostaje osłabiony. Podobnie jak w przypadku rozpadów promieniotwórczych liczba kwantów gamma wraz z grubością warstwy „x”, przez którą przechodzą, maleje wykładniczo jak e^{-x/x_0} , gdzie x_0 nazywany jest współczynnikiem osłabiania i jest on równy średniej grubości, jaką przebywa kwant gamma w danym materiale.

Współczynnik osłabienia zależy od energii i dla kwantów gamma emitowanych z potasu ($E = 1,46$ MeV) wynosi on około 150 m dla powietrza i 17 cm dla wody. Biorąc pod uwagę, że skład atomowy gleby jest podobny do wody i że gęstość gleby wynosi około⁴ $1,5$ g/cm³ (1,5 razy więcej niż gęstość wody), możemy przyjąć, że współczynnik osłabienia dla gleby wynosi około 17 cm/ $1,5 \approx 11$ cm. Widzimy zatem, że do powierzchni Ziemi będą docierały kwanty gamma głównie z cienkiej warstwy gleby⁵ wynoszącej około 30 cm.

Zawartość promieniotwórczego uranu, toru i potasu w glebie

Głównymi składnikami gleby są tlen O i krzem Si, a po kilka procent wkładu stanowi także aluminium Al, żelazo Fe, węgiel C, wodór H czy potas K. Wprawdzie interesujące nas izotopy potasu ⁴⁰K, uranu ²³⁸U i toru ²³²Th oraz izotopy promieniotwórcze pochodzące z ich rozpadów stanowią w glebie procentowo bardzo mały wkład ⁴⁰K ($\sim 3 \cdot 10^{-4}\%$), ²³⁸U ($\sim 3 \cdot 10^{-4}\%$), ²³²Th ($\sim 10^{-3}\%$), to mimo to jest ich zaskakująco dużo. Zauważmy, że 1 km² warstwy gleby o grubości 30 cm waży około 500 000 ton (10^6 m² · 0,3 m · 1,5 ton/m³). Nawet tak mała procentowa zawartość oznacza, że w warstwie ziemi o grubości 30 cm i powierzchni 1 km² jest około 4,5 tony toru ²³²Th, 1,5 tony uranu ²³⁸U i 1,5 tony promieniotwórczego potasu ⁴⁰K⁶. Biorąc pod uwagę masę atomową i średni czas życia ²³²Th ($2,03 \cdot 10^{10}$ lat), uranu ²³⁸U ($6,45 \cdot 10^9$ lat) i potasu ⁴⁰K ($1,85 \cdot 10^9$ lat) otrzymujemy, że aktywności właściwe, czyli liczby rozpadów na sekundę na jednostkę masy, wynoszą: ²³²Th – $4,06 \cdot 10^6$ Bq/kg, ²³⁸U – $1,24 \cdot 10^7$ Bq/kg oraz ⁴⁰K – $2,58 \cdot 10^8$ Bq/kg; zatem w jednym kilogramie gleby następuje w ciągu sekundy około 770 rozpadów promieniotwórczych potasu ⁴⁰K, 37 rozpadów ²³⁸U oraz 41 rozpadów ²³²Th.

⁴ W zależności od zawartości wody i rodzaju gleby gęstość może się znacznie wahać, u jednego z autorów w ogrodzie dość mokra gleba miała gęstość 2 g/cm³.

⁵ Jeśli współczynnik pochłaniania wynosi $x_0 = 11$ cm, to prawdopodobieństwo, że kwant gamma wyemitowany na skutek rozpadu potasu ⁴⁰K przeleci warstwę ziemi o grubości 11 cm wynosi $e^{-x/x_0} = e^{-1} = 0,37$. Prawdopodobieństwo przejścia przez warstwę o grubości 22 cm maleje do $e^{-2} = 0,14$, a dla warstwy o grubości 33 cm wynosi ono już tylko $e^{-3} = 0,05$.

⁶ Zawartość pierwiastków promieniotwórczych w glebie mocno waha się. Podane liczby są raczej oszacowaniami od dołu. Zawartość uranu w 500 000 ton gleby waha się od kilku do 30 ton.

Ile kwantów gamma na sekundę emituje kilogram gleby?

W wyniku rozpadów ^{40}K oraz pierwiastków promieniotwórczych powstałych z rozpadów uranu i toru emitowane są cząstki alfa, elektrony, a także kwanty gamma. W przypadku potasu ^{40}K kwant gamma emitowany jest w 11% rozpadów, czyli na skutek 770 rozpadów ^{40}K w jednym kilogramie gleby powstaje około 85 kwantów gamma na sekundę. Jeden rozpad ^{232}Th czy ^{238}U może powodować emisję bardzo wielu kwantów gamma pochodzących z kolejnych rozpadów pochodnych w szeregu (rys. 3 oraz tabele 1 i 2). Biorąc jednak pod uwagę prawdopodobieństwa emisji, okazuje się, że rozpad ^{232}Th i wszystkich jego pochodnych w szeregu powodują emisję średnio tylko około 2,5 kwantów gamma, a w przypadku rozpadu ^{238}U i jego pochodnych powstaje średnio tylko 3,6 kwantów gamma (można to wywnioskować z tabeli rozpadów dostępnych np. na stronie <http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm>). Zatem w jednym kilogramie gleby w ciągu sekundy powstaje około 85 kwantów gamma z potasu ^{40}K , około 102 kwanty gamma z pochodnych w szeregu torowym i około 133 kwanty gamma z szeregu uranowo-radowego.

Ile kwantów gamma dociera do powierzchni Ziemi?

Każdy kwant gamma przelatując przez materię wcześniej czy później ulegnie rozproszeniu lub pochłonięciu, głównie na skutek oddziaływania z elektronami, dlatego nie wszystkie kwanty gamma powstające w glebie dotrą do jej powierzchni. Dla oszacowania, ile kwantów dociera do powierzchni, przyjmijmy najpierw, że wszystkie lecą pionowo do góry (za chwilę uwolnimy to upraszczające, ale nierealistyczne założenie). Przy takim założeniu liczba kwantów gamma docierających na sekundę do powierzchni Ziemi S z warstwy o grubości dx na głębokości x jest następująca:

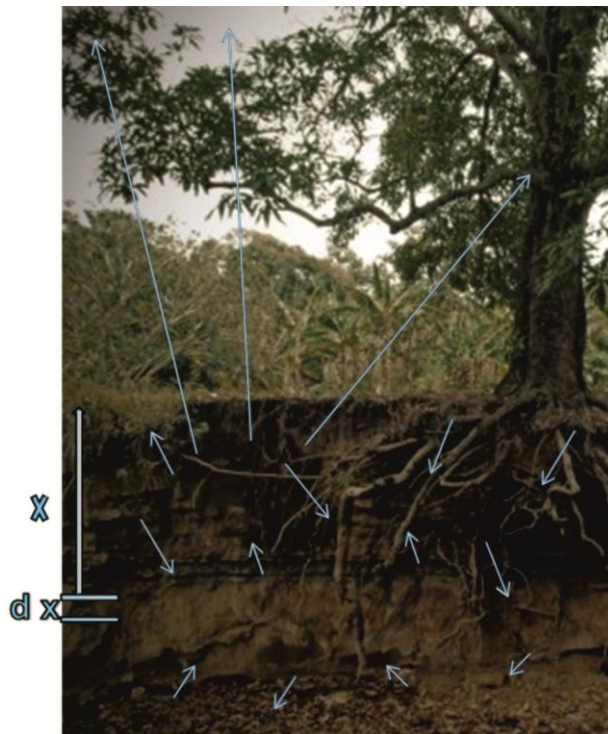
$$\rho \cdot dx \cdot S \cdot A \cdot e^{-x/x_0}, \quad (1)$$

gdzie, ρ oznacza gęstość gleby, x_0 – współczynnik osłabienia promieniowania gamma, A – oszacowaną powyżej przez nas liczbę kwantów gamma emitowanych na sekundę przez jednostkę masy gleby.

A zatem z całej głębokości będzie docierać do powierzchni:

$$\int_0^{\infty} (\rho \cdot dx \cdot S \cdot A \cdot e^{-x/x_0}) = \rho \cdot x_0 \cdot S \cdot A, \quad (2)$$

czyli tyle kwantów gamma w ciągu sekundy ile emituje warstwa o grubości równej współczynnikowi osłabienia.



Rys. 4. W wyniku rozpadów jąder atomów stanowiących naturalny składnik ziemi emitowane są kwanty gamma. Część kwantów gamma wydostaje się na powierzchnię i może przelecieć w powietrzu nawet kilkaset metrów zanim ulegną rozproszeniu lub pochłonięciu

Zanim podstawimy wartości do równania (2) zauważmy, że – by uwolnić założenie, że wszystkie kwanty gamma lecą pionowo do góry – wystarczy, jak w grubym przybliżeniu podzielimy ich liczbę przez cztery⁷. Zatem podstawiając wartości do równania (2) i dzieląc przez 4 otrzymujemy⁸, że do powierzchni dolatuje około 10 000 kwantów gamma na m².

⁷ Czynniki 2, ponieważ połowa leci w dół, a drugi czynnik 2 jest grubym przybliżeniem tego, że im mniejszy kąt tworzy kierunek lotu kwantu gamma z poziomem tym mniejsze szanse na wydostanie się na powierzchnię. Jest to grube założenie, ale w obliczu dużych wahań zawartości uranu i potasu w glebie, które mogą być nawet o rząd wielkości większe niż oszacowane w tym artykule, taka dokładność, mająca na celu jedynie uchwycenie rzędu wielkości, wydaje się wystarczająca.

⁸ Współczynnik osłabienia zmienia się z energią, zatem do dokładnych obliczeń należałoby uwzględnić tę zależność. Dla naszych grubych oszacowań przyjmujemy wartość współczynnika pochłaniania dla średniej energii kwantów gamma w danym szeregu. Przy takim założeniu wynik byłby dokładny, gdyby zależność współczynnika pochłaniania od energii była liniowa. Średnie energie kwantów gamma emitowanych w całym ciągu rozpadów w szeregu torowym i uranowo-radowym wynoszą odpowiednio ~0,9 i ~0,7 MeV. Współczynniki osłabienia w glebie dla tych energii wynoszą w przybliżeniu około 9 cm dla 0,9 MeV oraz 8 cm dla kwantów gamma o energii

Gdyby człowiek położył się na ziemi (zajmując około $0,7 \text{ m}^2$) to na jego ciało wpadałoby około 7000 kwantów gamma na sekundę pochodzących z rozpadu ^{40}K , ^{238}U i ^{232}Th . W pierwszym przybliżeniu podobna liczba kwantów gamma będzie promieniować na człowieka będącego w pozycji pionowej. W powietrzu współczynnik osłabienia promieniowania gamma o energii rzędu 1 MeV wynosi około 120 metrów, dlatego znaczna część kwantów gamma dolatuje na wysokość do kilkuset metrów. W latach pięćdziesiątych wykorzystywano ten fakt do poszukiwania złóż uranu – tereny badano przy użyciu samolotów i helikopterów z zamontowanymi detektorami promieniowania gamma.

Promieniowanie radonu na świeżym powietrzu

Do tej pory nie omówiliśmy głównego składnika dawki napromieniowania naturalnego, która pochodzi z rozpadów promieniotwórczych radonu⁹. Radon jest jednym z pierwiastków promieniotwórczych powstających w łańcuchu rozpadów inicjowanych zarówno przez uran jak i tor (tabele 1 i 2), jednak wyróżnia się od pozostałych pierwiastków tym, że w atomie radonu wszystkie powłoki elektronowe są w całości zapełnione i dlatego jest on gazem szlachetnym bardzo słabo reagującym z otoczeniem.

W szeregu uranowo-radowym (tabela 2) powstaje izotop radonu ^{222}Rn , a w szeregu torowym (tabela 1) izotop ^{220}Rn , ten ostatni przyjęło się nazywać toronem. Atomy radonu powstające blisko powierzchni minerałów (w skałach i w glebie) uwalniają się do powietrza i wody (fazy powietrznej lub wodnej między cząsteczkami) dzięki kinetycznej energii odrzutu uzyskiwanej w rozpadzie jądra atomu radu. W glebie z ziaren minerałów uwalnia się do 70% powstającego w nich radonu. Szybkość wydostawania się radonu na powierzchnię ziemi zależy od porowatości i wilgotności gleby, od ciśnienia atmosferycznego i innych czynników meteorologicznych. Na emisję radonu na powierzchnię wpływa także układ stref tektonicznych. Szczególnie sprzyjające wydobywaniu się radonu z dużych głębokości są uskoki skalne charakteryzujące się rozkruszeniem skał i szczelinami. O ile stężenie w atmosferze węgla ^{14}C powstającego w wyniku promieniowania kosmicznego jest w miarę stałe w czasie, to stężenie radonu i toronu ulega dużym wahaniom w zależności od lokalizacji, pory dnia, pory roku, a także od pogody. Większe stężenia radonu są późnym latem, a mniejsze w zimie. W Warszawie aktywność radonu wynosi około $2,7 \text{ Bq/m}^3$, ale w niektórych miejscowościach jest aż o rząd wielkości większa: na przykład

0,7 MeV. Podstawiając wartości do równania (2) i dzieląc przez 4 otrzymujemy, że do powierzchni 1 m^2 w ciągu sekundy dociera:

$$^{40}\text{K} \rightarrow 1500 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,11 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 85 \text{ kg}^{-1} / 4 \approx 3500$$

$$^{238}\text{U} \rightarrow 1500 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,08 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 133 \text{ kg}^{-1} / 4 \approx 4000$$

$$^{232}\text{Th} \rightarrow 1500 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,09 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 102 \text{ kg}^{-1} / 4 \approx 3400$$

⁹ Radon jest najcięższym gazem szlachetnym mającym najwyższą temperaturę topnienia i wrzenia.

w Kowarach (30 Bq/m^3) czy w Świeradowie (24 Bq/m^3)¹⁰. Podwyższona aktywność w południowo-zachodniej Polsce wynika z budowy geologicznej Sudetów z dużymi obszarami z odsłoniętymi skałami magmowymi. Średnia aktywność radonu w powietrzu na Ziemi nad lądami wynosi około $3,7 \text{ Bq/m}^3$.

Promieniowanie radonu wewnątrz budynków

Stężenie radonu jest znacznie większe wewnątrz budynków niż na zewnątrz. W Polsce średnie stężenie aktywności radonu w mieszkaniach wynosi około 40 Bq/m^3 i jest ono, odwrotnie niż na świeżym powietrzu, większe w zimie niż w lecie, co wynika zapewne z częstszego wietrzenia pomieszczeń latem niż zimą. W krajach skandynawskich na przykład stężenie radonu jest znacznie większe niż w Polsce; średnia aktywność radonu w domach wynosi tam około 100 Bq/m^3 . Dla porównania w tabeli 3 podane są wartości aktywności radonu w domach w kilku wybranych obszarach w Polsce i Iranie. Jak widać w Iranie aktywność ta też jest znacznie większa niż w Polsce, choć i w Polsce zdarzają się obszary o podniesionym stężeniu aktywności radonu. Na przykład, średnia wartość stężenia radonu w pokojach na parterze budynków w Jeleniej Górze w 2000 roku wynosiła około 170 Bq/m^3 , a najwyższą zmierzoną w pomieszczeniach mieszkalnych wartość zaobserwowano w domu jednorodzinnym w Jeleniej Górze i wynosiła ona około 3800 Bq/m^3 , czyli prawie 100 razy więcej niż średnia w Polsce.

Tabela 3. Stężenie radonu w domach w kilku wybranych obszarach w Polsce i Iranie

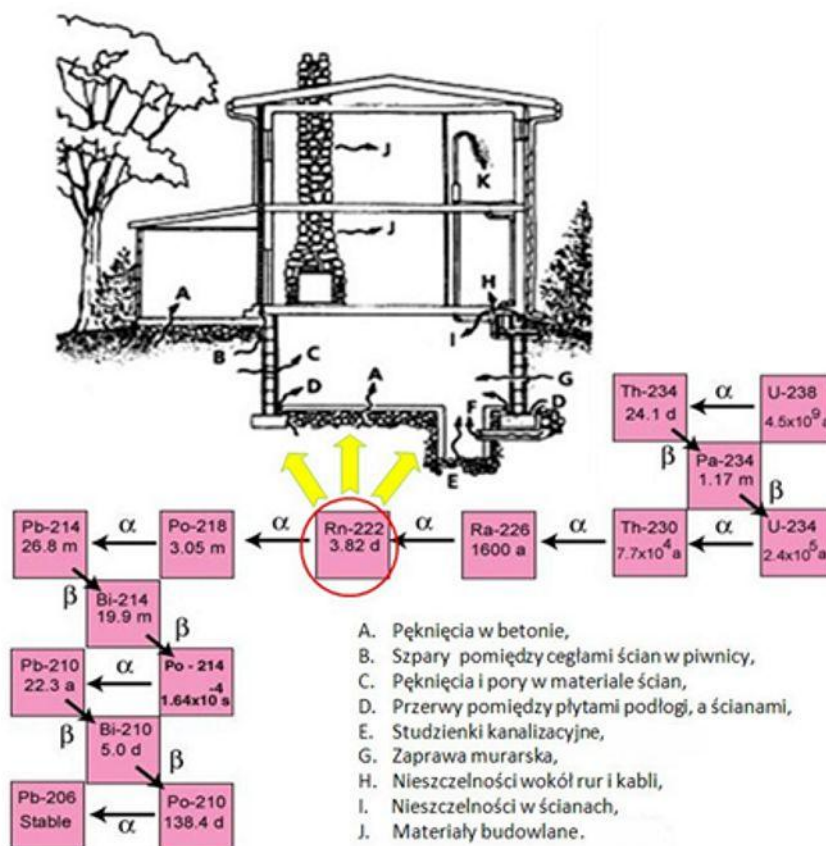
Polska	Rn (Bq/m^3)	Iran	Rn (Bq/m^3)
Olsztyńskie	51,1	Ramsar	578
Elbląskie	29,3	Tehran	80
Gdańskie	33,8	Babolsar	88
Konińskie	57,2	Gonabad	84

Jak radon dostaje się do domów?

Radon przedostaje się do wnętrza domów z podłoża i z materiałów budowlanych, a także z wody i gazu ziemnego używanych w codziennych czynnościach domowym (patrz rys. 5), jego stężenie wewnątrz domu mocno zależy od konstrukcji budowli oraz od rodzaju podłoża. W materiałach budowlanych radon powstaje jako jeden z pochodnych pierwiastków z szeregów promieniotwórczych uranu i toru (tabele 1 i 2). Stężenie radonu w materiałach budowlanych bardzo mocno zależy od miejsca gdzie były one wykonane. Miarą tego stężenia może być aktywność radu, z którego radon powstaje. Na przykład w jednym

¹⁰ Jednostką aktywności jest Bq (bekerel). 1 Bq oznacza, że średnio następuje jeden rozpad na sekundę. Do opisanego stężenia radonu w powietrzu używamy jednostkę Bq/m^3 oznaczającą liczbę rozpadów jąder radonu w 1 m^3 powietrza w ciągu jednej sekundy.

kilogramie cegły polskiej następuje średnio około 20 rozpadów ^{226}Ra na sekundę, a w niemieckiej aż około 290. Ale za to aktywność radu w gipsie w Polsce waha się od 26 do 740 Bq/kg, a w Niemczech nie przekracza od 20 Bq/kg¹¹.



Rys. 5. Szereg promieniotwórczy prowadzący do powstania radonu ^{222}Rn oraz drogi, którymi radon przedostaje się do wnętrza domów

Różnice ciśnienia pomiędzy podłożem a wnętrzem domu powodują, że radon jest „wsysany” do wnętrza budynków z gleby (rys. 5). Radon dostający się z podłoża stanowi średnio większy przyczynek do stężenia w domach niż jego emanacja z materiałów budowlanych. Radon przedostaje się do środka domów poprzez pęknięcia w płytach betonowych, studzienki kanalizacyjne, nieszczelności wokół rur doprowadzających wodę, niedokładności przy łączeniach różnych części budynku. Radon przenika do środka także z wodą.

¹¹ Największa aktywność w materiałach budowlanych pochodzi od potasu ^{40}K . Na przykład w ceglach w Iranie wynosi ona średnio 850 Bq/kg.

Zawartość radonu promieniotwórczego w wodzie

Radon jest rozpuszczalny w wodzie, ale jego rozpuszczalność spada ze wzrostem temperatury, dlatego radon znajdujący się w wodzie używanej w domu do codziennych czynności uwalnia się, jeśli tylko następuje wzrost jej temperatury, na przykład w trakcie gotowania, ciepłych kąpeli czy brania prysznic. Jednak nie każda woda zawiera znaczące ilości radonu. Jeśli woda pochodzi z ujęć z rzek czy jezior, wtedy większość radonu zostaje uwolniona zanim woda dotrze do domów. Zawartość radonu może być jednak znacznie większa, jeśli woda pochodzi ze źródeł podziemnych, choć stężenie aktywności radonu i tak bardzo mocno zależy od lokalnych warunków geologicznych. W niektórych miejscach w Polsce jest ono stosunkowo wysokie, na przykład w obszarze Jeleniej Góry gdzie ponad połowa potrzeb miasta pokrywana jest wodą o stężeniu aktywności radonu wynoszącą około 200 Bq/l. Średnia aktywność promieniotwórcza wód jest mała i wynosi około 15 Bq/l wody morskiej i tylko 0,1 Bq/l wody z Wisły, ale dużo większe stężenia radonu występują w niektórych wodach podziemnych. Na przykład w wodach ze źródła Marii Skłodowskiej-Curie w Świeradowie Zdroju stwierdzono aktywność 3000 Bq/l.

Dawka napromieniowania otrzymana z wodą pitną

Zastanówmy się, jaką dawkę napromieniowania otrzymuje człowiek w Jeleniej Górze wypijający jedną szklankę wody dziennie (~0,2 litra) o stężeniu aktywności radonu wynoszącym ~200 Bq/l. Jedna szklanka wody dziennie oznacza, że w ciągu roku człowiek wypija $0,2 \cdot 365 = 73$ l takiej wody, a zatem wypija ilość radonu, która w sumie powoduje aktywność $200 \text{ Bq/l} \cdot 73 \text{ l} \approx 15\,000 \text{ Bq}$.

15 000 Bq wchłoniętego radonu oznacza, że do organizmu dostało się około $7 \cdot 10^9$ atomów radonu¹². Gdyby każde z tych jąder atomowych rozpadło się w organizmie, to wtedy pochłonęlibyśmy w wyniku jonizacji wywoływanej przez cząstki alfa emitowane z radonu i jego pochodnych (^{222}Rn (5,49 MeV) \rightarrow ^{218}Po (6,11 MeV) \rightarrow ^{214}Po (7,83 MeV)) dawkę energii wynoszącą: $7 \cdot 10^9 \cdot 19,43 \text{ MeV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} \approx 22 \text{ mJ}$. W przypadku człowieka o masie 70 kg oznaczałoby to dawkę pochłoniętą w wysokości 0,31 J/kg. Biorąc pod uwagę współczynnik szkodliwości biologicznej cząstek alfa wynoszący 20 otrzymujemy dawkę skuteczną równą ~6,2 mSv. Jednak nie każdy atom radonu pozostaje w człowieku

¹² Liczba jąder promieniotwórczych zanika w czasie zgodnie z prawem

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-t/t_{\text{średni}}}, \quad (3)$$

gdzie t oznacza czas, a $t_{\text{średni}}$ oznacza średni czas życia pojedynczego jądra, $N(t)$ – liczbę jąder, które dotrwały do czasu t , a N_0 – liczbę jąder w chwili $t = 0$. Stąd aktywność w chwili t , czyli liczba rozpadów na sekundę, wynosi:

$$A(t) = |dN/dt| = N(t)/t_{\text{średni}}. \quad (4)$$

Zatem, aktywność w danej chwili jest równa liczbie jąder, które dotrwały do tej chwili podzielone przez ich średni czas życia. Średni czas życia radonu ^{222}Rn wynosi około 5,5 dnia (475 200 s), czyli 15 000 Bq wchłoniętego radonu oznacza, że do organizmu dostało się $15\,000 \text{ Bq} \cdot 475\,200 \text{ s} \approx 7,1 \cdot 10^9$ atomów radonu.

do momentu rozpadu tylko w większości wydalany jest wraz z wodą w tym samym dniu, więc dawka napromieniowania, jaką otrzymujemy w wyniku picia dziennie szklanki wody o aktywności radonu 200 Bq/l, wynosi około $1 \text{ mSv} = (6,2 \text{ mSv} \cdot (1 - e^{-1/5,5}))$, czyli zwiększa naturalne napromieniowanie z 2,4 do 3,4 mSv, a więc jest to wciąż znacznie mniej niż dawka promieniowania otrzymywana przez Skandynawów czy Amerykanów w USA. Jest to oczywiście oszacowanie górnej granicy, ponieważ jeśli woda zostanie przed spożyciem podgrzana, to część rozpuszczonego w niej radonu się ulotni, a zagotowanie jej spowoduje prawie całkowite pozbycie się radonu.

Dawka napromieniowania radonem z powietrza

Oszacujmy teraz zewnętrzne napromieniowanie człowieka z powodu obecności radonu w powietrzu. Jest ono praktycznie zaniedbywalne, ponieważ większość cząstek alfa o energii kilku MeV nie przeleci przez ubranie. Rozważmy więc dla zabawy dawkę napromieniowania nagiego człowieka przebywającego przez cały rok w domu. Otaczająca go warstwa powietrza, z której może dolecieć do skóry cząstka alfa emitowana z radonu, wynosi około 4 cm. Zakładając 2 m^2 powierzchni ciała człowieka daje to objętość $2 \cdot 0,04 = 0,08 \text{ m}^3$. Energia cząstek alfa maleje wraz z grubością warstwy powietrza, przez którą przeleciały, więc z grubsza średnia energia cząstek alfa dolatujących do człowieka będzie wynosić $\sim 2,5 \text{ MeV}$. Przyjmując, że aktywność radonu w mieszkaniu wynosi 40 Bq/m^3 otrzymamy, że cząstki alfa z radonu deponują w ciągu roku w skórze nagiego człowieka energię równą:

$$2,5 \text{ MeV} \cdot 0,08 \text{ m}^3 \cdot 40 \text{ Bq/m}^3 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

Masa skóry człowieka ważącego 70 kg wynosi około 4 kg, współczynnik szkodliwości cząstek alfa wynosi 20, a współczynnik wagowy do obliczania dawki dla skóry jest równy 0,01. Dawka skuteczna otrzymywana w ciągu roku przez nagiego człowieka przebywającego cały rok w domu wynosiłaby zatem:

$$4 \cdot 10^{-5} \text{ J/4 kg} \cdot 20 \cdot 0,01 = 0,002 \text{ mSv.}$$

Jest to wartość zaniedbywalna w porównaniu z całkowitą dawką od promieniowania naturalnego.

Dawka napromieniowania radonem wdychanym wraz z powietrzem

Obliczmy, jaki przyczynek daje promieniowanie radonu wdychanego razem z powietrzem. Zakładając, że podczas jednego oddechu wdychamy średnio jeden litr powietrza, i że wdychamy i wydychamy ze stałą szybkością możemy przyjąć, że średnio przez cały czas mamy w płucach około 0,5 litra powietrza ciągle wymienianego z otoczeniem.

Zakładając dodatkowo, że przebywamy przez całą dobę w domu, w powietrzu tym następowałoby średnio około 40 rozpadów radonu w m^3 na sekundę, czyli $4 \cdot 10^{-2}$ rozpadów na litr na sekundę. W ciągu roku w naszym układzie

oddechowym nastąpi zatem około: $4 \cdot 10^{-2} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 \approx 13 \cdot 10^5$ rozpadów. W jednym rozpadzie ^{222}Rn emitowana jest cząstka alfa o energii 5,5 MeV, a zatem dawka promieniowania w przeliczeniu na 1 kg (płuca człowieka ważą około 1 kg) będzie wynosić:

$$5,5 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 13 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV/kg} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ J/kg}$$

W przypadku promieniowania alfa współczynnik szkodliwości biologicznej wynosi 20, a współczynnik wagowy dawki dla tkanek płuc wynosi 0,12 stąd otrzymujemy dawkę skuteczną w wielkości $20 \cdot 0,12 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Sv} = 0,0026 \text{ mSv}$.

Obliczona powyżej dawka skuteczna jest znacznie mniejsza niż rzeczywiste napromieniowanie powodowane przez radon. Rzeczywistą dawkę trudno jest oszacować, ponieważ trzeba uwzględnić także przyczynę od produktów rozpadu radonu, głównie od izotopów polonu ^{218}Po i ^{214}Po , które jako metale ciężkie osadzają się na śluzie układu oddechowego wraz z pyłami i aerozolami, podczas gdy radon razem z powietrzem jest wydychany na zewnątrz. W wyniku rozpadu promieniotwórczego polonu emitowane są cząstki alfa o łącznej energii kinetycznej $\sim 14 \text{ MeV}$, czyli na skutek rozpadu ^{218}Po i ^{214}Po w nabłonku dróg oddechowych deponowane jest kilkakrotnie więcej energii niż z jednego rozpadu samego radonu. Ale ze względu na absorpcję w śluzie dróg oddechowych aerozoli zawierających polon, ołów i bizmut, dawka od nich jest dużo większa niż od samego radonu. W Polsce, średnia dawka wywoływana promieniotwórczością radonu wynosi 1,3 mSv. Dawka ta jest większa w domach drewnianych, gdzie średnio stężenie radonu wynosi 61 Bq/m^3 , a mniejsza w domach betonowych ze średnim stężeniem wynoszącym 27 Bq/m^3 .

Ile cząstek alfa napromieniowuje nas w ciągu sekundy?

Na koniec, z czystej ciekawości obliczmy jeszcze, ile cząstek alfa z rozpadów promieniotwórczych radonu i jego pochodnych grzęźnie w naszych komórkach w ciągu sekundy.

W pierwszym przybliżeniu, ze względu na znacznie mniejsze energie elektronów z rozpadów beta oraz 20 razy mniejszą szkodliwość biologiczną elektronów w stosunku do cząstek alfa możemy przyjąć, że główny wkład do dawki od radonu i jego pochodnych mają cząstki alfa. Zakładając, że średnio w Polsce większość dawki od radonu przyjmowana jest w układzie oddechowym, pamiętając, że czynnik szkodliwości biologicznej dla cząstek alfa wynosi 20 i czynnik wagowy dla płuc 0,12 otrzymujemy, że w komórkach układu oddechowego w ciągu roku jest deponowana energia 0,54 mJ, a to odpowiada pochłanianiu około 18 cząstek alfa na sekundę¹³.

¹³ Dawka napromieniowania od radonu i jego pochodnych wynosi w Polsce średnio 1,3 mSv. Taka dawka skuteczna napromieniowania oznacza, że w człowieku cząstki alfa musiały zdeponować energię wynoszącą: $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ J/kg} \cdot 1 \text{ kg} / 20 / 0,12 = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ J} = 0,54 \text{ mJ}$. Co odpowiada $0,54 \text{ mJ} \cdot 0,625 \cdot 10^{19} \text{ eV} / \text{J} / 6 \text{ MeV} = 5,6 \cdot 10^8$ cząstkom alfa. Po podzieleniu przez liczbę sekund

W CIĄGU JEDNEJ SEKUNDY:

- Wewnątrz człowieka następuje około 8000 rozpadów promieniotwórczych jąder atomowych, głównie izotopów promieniotwórczych potasu ^{40}K , węgla ^{14}C oraz wodoru ^3H .
- Przez człowieka przelatuje ponad 100 wysokoenergetycznych cząstek z promieniowania kosmicznego, w tym około 70 mionów, 50 kwantów gamma, kilkadziesiąt elektronów i antyelektronów oraz kilka protonów i neutronów.
- Przez człowieka przelatuje około 7000 kwantów gamma emitowanych z ziemi, głównie z rozpadów potasu ^{40}K oraz ciągów rozpadów z szeregu promieniotwórczego uranu ^{238}U oraz toru ^{232}Th .
- Człowiek pochłania około 18 cząstek alfa na skutek promieniowania radonu i jego pochodnych.

Nieustannie naświetlani jesteśmy:

- promieniowaniem alfa – radon i polon (wdychany oraz z pożywienia),
- promieniowaniem beta – węgiel, potas, wodór (wdychany i z pożywienia),
- promieniowaniem gamma – głównie z potasu oraz pochodnych uranu i toru.

Podziękowania

Autorzy są wdzięczni za wsparcie finansowe Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w ramach programu MPD oraz pani Teresie Gucwie-Ryś za pomoc w przygotowaniu rysunków i tabel.

Literatura

- [1] A. Hrynkiewicz, *Postępy Fizyki*, t. 44 (1993) 439.
- [2] *Biuletyn Informacyjny Polskiej Agencji Atomistyki*, Nr 2(84)/2011.
- [3] K. Nakamura et al., *Review of Particle Physics*, *J. Phys. G* 37 (2010) 075021, http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/contents_sports.html
- [4] *Rocznik Państwowego Zakładu Higieny, Kwartalnik* 2011, t. 62, Nr 1.
- [5] J. Kastlander, *In situ measurements of radionuclide concentration in soil*, praca doktorska, Uniwersytet w Sztokholmie (2010).
- [6] S. Jowzaee et al., *Radon detection in mineral waters by liquid scintillation technique and geological investigation in the north of Iran*, Environmental Radioactivity 2010 conference, Rome, Advances in Liquid Scintillation Spectrometry.
- [7] P. Moskal, *Metoda datowania węglem ^{14}C . Skąd wiemy, kiedy wymarły mamuty*, *Neutrino* Nr 16 (2012) 1.
- [8] P. Moskal, *Dawki promieniowania jądrowego*, *Foton* Nr 112 (2011) 9.

w roku (365 dni · 24 g/dzień · 3600 s/godzinę = 31 536 000) otrzymujemy około 18 cząstek alfa na sekundę. Dla uproszczenia przyjęliśmy, że cząstki alfa mają średnio energię 6 MeV.

- [9] P. Moskal, *Energia jądrowa w kuchni: konserwowanie żywności za pomocą promieniowania jądrowego*, Foton Nr 109 (2010) 8.
- [10] R. Szepeke, *Promieniowanie jest wśród nas*, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1989.
- [11] P. Jaracz, *Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2001.
- [12] P. Półtorak, *Pomiary aktywności atmosferycznego radonu w Krakowie*, Praca magisterska, AGH, 2007.
- [13] B.R.S. Minty, *AGS Journal of Australian Geology & Geophysics* 17 (1997) 39.
- [14] E. Witkowska, *Zawartość radonu w powietrzu, jego pochodzenie, pomiary, obniżanie stężenia*, Praca zaliczeniowa, Politechnika Warszawska, 2003.
- [15] K. Pachocki, B. Gorzkowski, *Komunikaty z Sesji Naukowej „Radon w środowisku”*, Instytut Fizyki Jądrowej, Kraków 2000, <http://www.staff.amu.edu.pl/~pawula/BIOL.html>
- [16] A. Pawuła, *Komunikaty z Sesji Naukowej „Radon w środowisku”*, Instytut Fizyki Jądrowej, Kraków 2000, <http://www.staff.amu.edu.pl/~pawula/BIOL.html>
- [17] S. Mehdizadeh et al., *Natural radioactivity in building materials in Iran*, *Nukleonika* 56 (2011) 363.
- [18] M. Nowina-Konopka, *Indoor radon levels in north-western Poland*, *Radiation protection dosimetry* 62 (1995) 239.
- [19] M. Sohrabi, A.R. Solaymanian, *Indoor radon level measurements in some regions of Iran*, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 15 (1988) 613.
- [20] *Average U.S. sources of radiation exposure*, NCRP report no 160/2006, <http://www.epa.gov/rpdweb00/understand/perspective.html>