

ROZDZIAŁ XIII. PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ ŚRODOWISKA¹

13. 1 Uwagi ogólne

Rozwojowi naszego Wszechświata, a więc i Ziemi i organizmów na niej towarzyszyło zawsze promieniowanie elektromagnetyczne i korpuskularne; było i jest ono nierozdzielną częścią tego rozwoju. Z Kosmosu dochodzi do nas oprócz światła widzialnego promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie niskich energii (mikrofale, podczerwień, nadfiolet), dochodzi do nas także promieniowanie korpuskularne, złożone z cząstek subatomowych, których prędkości potrafią osiągać 200 000 km/s: 5 okrążeń Ziemi wokół równika w czasie jednej sekundy! Składnikami promieniowania jądrowego, dochodzącego do nas z Kosmosu są protony, miony, piony, cząstki alfa, elektrony i pozytony oraz fotony: promieniowanie X i γ (rys.13.1). Biorąc pod uwagę inne naturalne źródła promieniowania w naszym otoczeniu (powiemy o nich za chwilę) można obliczyć, że w każdej sekundzie przenika przez nas około 15000 cząstek jonizujących. Teoretycznie, każdy akt jonizacji w obrębie naszych komórek może doprowadzić do zainicjowania nowotworu lub chorób genetycznych. Podczas niektórych wielokrotnych prześwietleń, w procedurze fluoroskopii czy tomografii komputerowej, przenika przez nasze ciało aż 100 miliardów fotonów. Jak widać, choć teoretycznie każda cząstka promieniowania jonizującego może być groźna, szansa na to, aby się taką stała jest bardzo niewielka: jeśli nawet wystąpi uszkodzenie w obrębie komórki, może być ono zreperowane dzięki naturalnym mechanizmom obronnym organizmu. Jak się ocenia, prawdopodobieństwo, iż dana cząstka, czy kwant gamma (foton) wywoła zmiany nowotworowe lub genetyczne wynosi jeden do $3 \cdot 10^{16}$. W skali całej ludności Ziemi oznacza to nieznaczająco małe prawdopodobieństwo zagrożenie życia. Choroby nowotworowe jednak, na które umiera ok. 20% ludzi, dalece nie są jedynymi, prowadzącymi do zgonu (np. na choroby serca umiera większy procent ludzi).

Oprócz naturalnych źródeł, do których obok promieniowania z Kosmosu zaliczamy promieniowanie pochodzące z nuklidów promieniotwórczych znajdujących się w skałach i glebie (np. uran-235 i 238, tor-232, wreszcie potas-40), w samym człowieku znajdują się pewne ilości jąder promieniotwórczych. Dodatkowo produkujemy źródła sztuczne, z których najbardziej znanymi są trzy: bomby jądrowe, reaktory jądrowe i źródła do terapii, w tym akceleratory medyczne. Choć takie źródła wnoszą wkład do ogólnego bilansu poziomu promieniowania, łatwo pokazać, że jest to wkład stosunkowo niewielki, jeśli porówna się go z poziomem tła, tj. promieniowaniem nas otaczającym, które ewidentnie nie powoduje znaczących szkód.

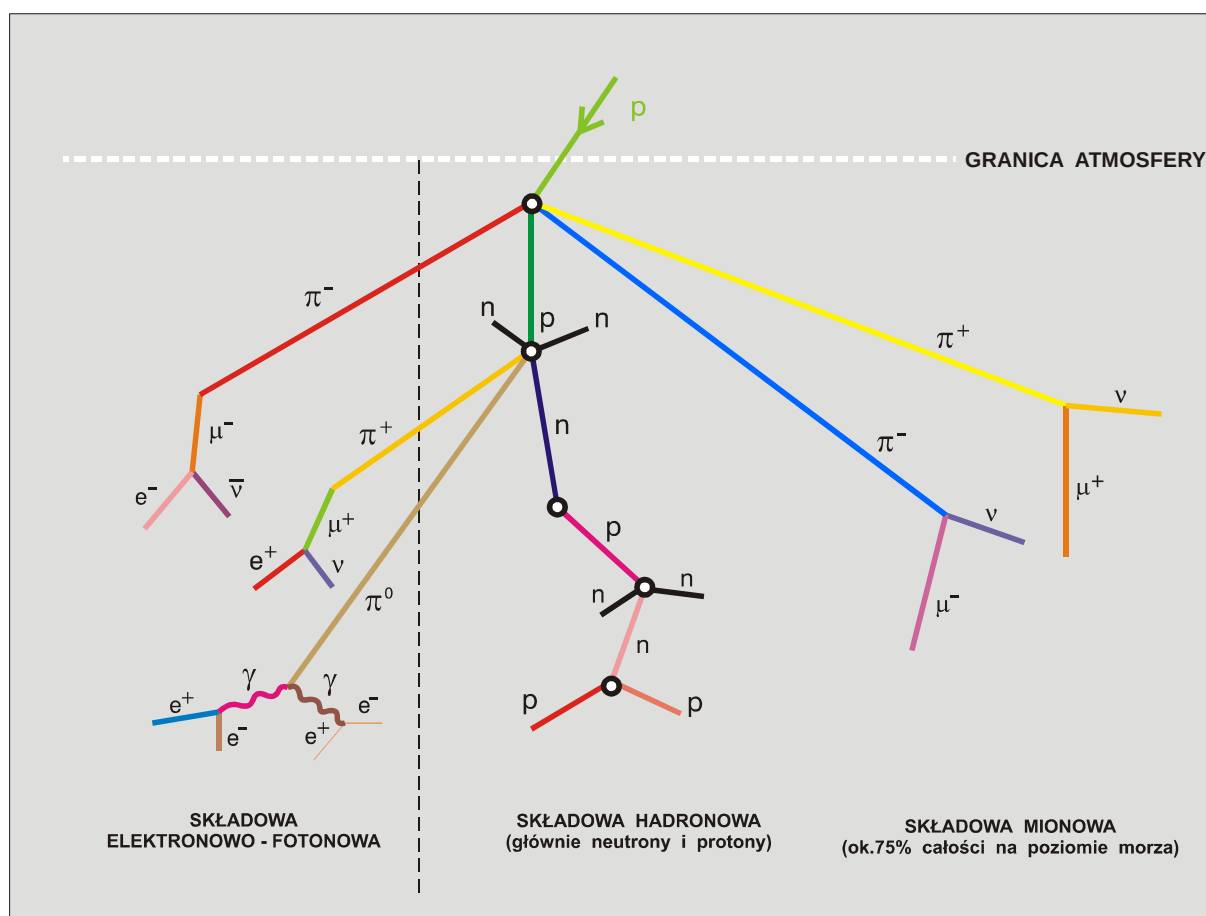
13.2 Promieniowanie naturalne wokół nas

13.2.1 Promieniowanie kosmiczne

Jak mówiliśmy, pierwszym źródłem promieniowania jonizującego jest Kosmos. W zewnętrznych warstwach atmosfery napotykamy całe widmo promieniowania elektromagnetycznego: od widzialnego do wysokoenergetycznych kwantów gamma, a także intensywne, wysokoenergetyczne promieniowanie korpuskularne.

¹ Rozdział ten jest nieznacznie rozszerzonym fragmentem broszury L.Dobrzyński, E.Droste, W.Trojanowski, R.Wońkiewicz, *Spotkanie z promieniotwórczością*, IPJ-Świerk (2005)

Wyniki pomiarów wskazują, iż na półkuli północnej Ziemi i szerokości geograficznej powyżej 55° przez każdy centymetr kwadratowy przechodzi w ciągu godziny² ok. 4500 protonów, 600 cząstek α , 30 jonów C, N i O, 8 jąder Mg, 3 wapnia i 1 żelaza. Wielkie energie cząstek promieniowania kosmicznego (od ok. 100 MeV do 10^{20} eV) są na szczęście znacznie wytracane w procesach zderzeń cząstek z jądrami i atomami atmosfery otaczającej Ziemię. W wyniku zderzeń wysokoenergetycznych protonów z jądrami dominujących w atmosferze ziemskiej atomów tlenu, czy azotu, powstają neutrony, protony, piony (zarówno obojętne π^0 , jak i naładowane π^+ i π^-), kaony i inne cząstki elementarne. Wysokoenergetyczne fotony (promienie gamma) mogą w obecności innych jąder przemienić się w parę elektron i pozyton (elektron dodatnio naładowany), piony rozpaść się na miony i neutrino, miony również nie są cząstkami trwałymi. Łączna dawka od promieniowania kosmicznego, to 0,3 – 0,6 mSv.



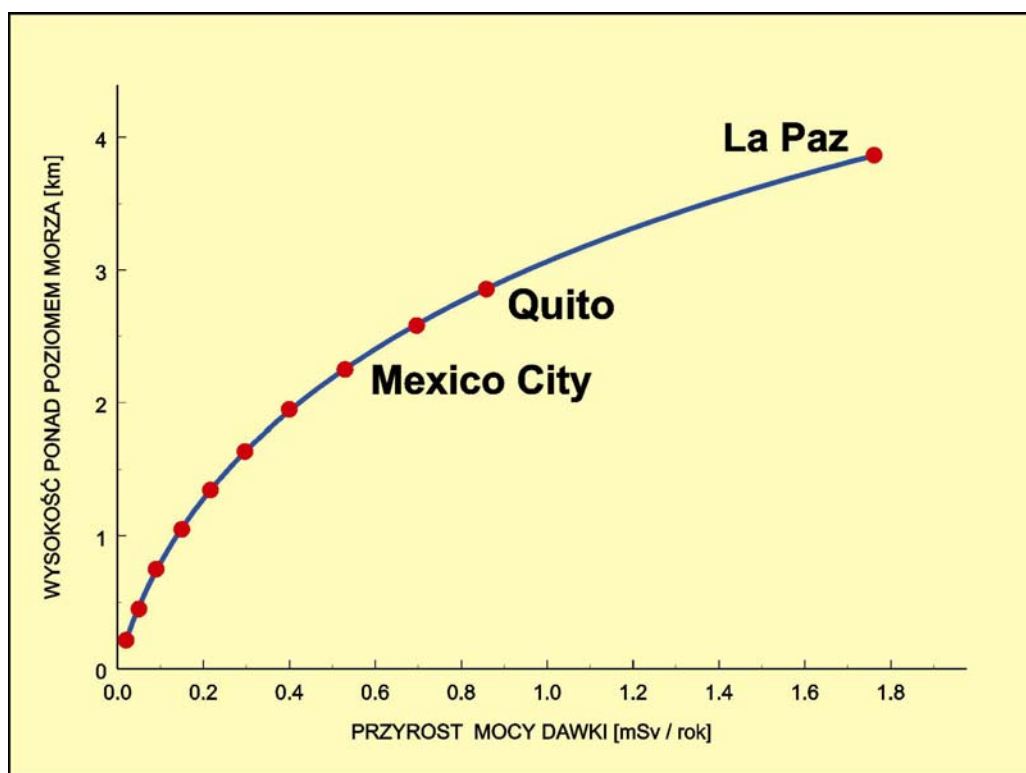
Rys. 13.1 Promieniowanie kosmiczne i jego składowe

Promieniowanie kosmiczne docierające do atmosfery ziemskiej zawiera promieniowanie gamma, neutrony i inne cząstki, a dodatkowo – w wyniku oddziaływań z atmosferą tworzą się nowe, promieniotwórcze izotopy znanych pierwiastków, obficie występujących na Ziemi, jak tryt, ^7Be , ^{14}C i ^{22}Na . Promieniowanie kosmiczne zawiera także cząstki i promieniowanie

² Wanda Leyko w „Biofizyka dla biologów”, pod red. M.Bryszewskiej i W.Leyko, PWN, Warszawa (1997), str. 418

elektromagnetyczne pochodzące ze Słońca. Wkład od nich jest jednak niewielki i zmienia się wraz z aktywnością Słońca.

Ponieważ cząstki promieniowania kosmicznego niosą często ładunek elektryczny, ich ruch zależy od pola magnetycznego otaczającego Ziemię. Najsilniejszy wpływ tego pola widoczny jest na równiku, gdzie pole ziemskie odchyła tory cząstek znajdujących się stosunkowo wysoko nad Ziemią, podczas gdy w obszarach podbiegunowych ruch cząstek podąża stosunkowo blisko linii sił pola magnetycznego, pozwalając im wnikać głębiej w atmosferę. W wyniku tego procesu dawka od neutronów na biegunach ziemskich jest relatywnie większa. Innym efektem wzbudzenia cząsteczek atmosfery jest zjawisko zorzy polarnej.



Rys. 13.2 Zależność dawki od wysokości nad poziomem morza

Udział wtórnych neutronów zmienia się z wysokością nad poziomem morza, co zasadniczo zmienia dawkę, jako że współczynnik jakości promieniowania wynosi tu 10 – 20. I tak wkład do dawki na poziomie morza wynosi ok. 0,3 mSv, podczas gdy na wysokości 1500 – 2000 m powyżej poziomu morza wzrasta niemal dwukrotnie. W górach, na wysokości 10 000 m dawka wzrasta dziesięciokrotnie, głównie dzięki udziałowi neutronów w promieniowaniu kosmicznym. Moc dawki na poziomie morza wynosi ok. 0,03 μ Sv/godz, na poziomie 2000 m. wynosi już 0,1 μ Sv/godz (czyli ok. 0,88 mSv/rok), na poziomie 12 km – 5 μ Sv/godz, a na wysokości 20 km nad poziomem morza aż 13 μ Sv/godz. Zmienność dawki z wysokością nad poziomem morza łatwo zaobserwować podczas lotów samolotem. Promieniowanie w znacznej części jest w stanie przejść przez skorupę samolotu. Podczas lotu na wysokości 8500 m dawka pochodząca od promieniowania kosmicznego wzrasta około czterdziestokrotnie w porównaniu z dawką na poziomie morza. Dane niemieckie wskazują, że załoga samolotów, spędzająca 600 godzin w locie na wysokości rzędu 10 000 m otrzymuje dodatkową dawkę w wysokości ok. 3 mSv. Sytuację tę ilustruje rys. 13.2, na którym każdy punkt oznacza inną, konkretną miejscowość (ich nazwy podaliśmy tylko w trzech przypadkach).

Za pracą Bouville'a i Lowdera³ moc dawki równoważnej dla składowej jonizującej bezpośrednio dla wysokości $z < 2$ km nad poziomem morza można opisać wzorem:

$$H(z) = H(0) \{0,21e^{-1,65z} + 0,80e^{0,45z}\}, \quad (13.1)$$

gdzie $H(0)$ wynosi 240 $\mu\text{Sv/rok}$ (27 nGy/h), natomiast dla składowej neutronowej promieniowania

$$H_n(z) = H_n(0)e^{1,04z}, \quad (13.2)$$

gdzie $H_n(0) = 20 \mu\text{Sv/rok}$. Wielkość ta związana jest ze strumieniem składowej neutronowej na poziomie morza, wynoszącej 0,008 $\text{n/cm}^2\text{s}$, odpowiadającej mocy dawki pochłoniętej $4 \cdot 10^{-10} \text{ Gy/h}$.

13.2.2 Promieniowanie skał i gleb

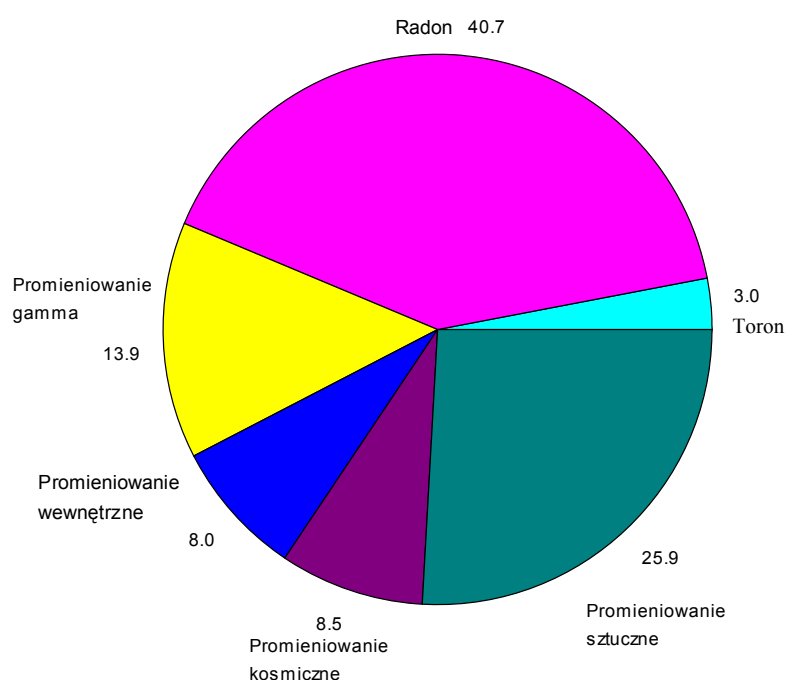
Jak wspominaliśmy, skorupa ziemska zawiera sporo jąder (nuklidów) promieniotwórczych, z których główne można zebrać w cztery *szeregi (rodziny) promieniotwórcze*: uranowo-radowy, uranowo-aktynowy, toru i neptunu. Pierwszy z nich zaczyna się od ^{238}U i kończy na stabilnym ^{206}Pb . Okres połowicznego zaniku ^{238}U wynosi $4,47 \cdot 10^9$ lat. Szereg uranowo-aktynowy rozpoczyna ^{235}U ($T_{1/2} = 7,038 \cdot 10^8$ lat) i kończy ^{207}Pb . Szereg torowy rozpoczyna ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,405 \cdot 10^{10}$ lat), a kończy ^{208}Pb . Wreszcie, szereg neptunowy bierze początek w rozpadzie ^{237}Np ($T_{1/2} = 2,14 \cdot 10^6$ lat) i kończy na ^{209}Bi .

Utworzone kilka miliardów lat temu aktywne (promieniotwórcze) jądra jak ^{144}Nd czy ^{235}U przetrwały do dziś. Najczęściej spotykanymi izotopami promieniotwórczymi w skałach są ^{40}K , ^{87}Rb oraz produkty rozpadów promieniotwórczych ^{238}U i ^{232}Th . Spośród długożyciowych pierwiastków, zasadniczy wkład do promieniotwórczości naturalnej Ziemi wnoszą ^{235}U i ^{238}U , ^{226}Ra i ^{228}Ra oraz ^{210}Pb . Te trzy ostatnie nuklidy są wchłaniane przez rośliny i poprzez łańcuch pokarmowy dostają się też do człowieka, podobnie jak inny popularny izotop promieniotwórczy ^{40}K . Wchłanianymi przez człowieka są również ^{137}Cs i ^{90}Sr , które, jako produkty reakcji rozszczepienia uranu, mogą być rozpraszane w środowisku po wybuchach jądrowych oraz w wyniku awarii reaktorów, takich jak np. pożar elektrowni czarnobylskiej. Zarówno promieniotwórczy izotop cezu, gromadzący się w tkankach miękkich, jak i promieniotwórczy izotop strontu, gromadzący się w kościach, mogą być groźne dla organizmu ludzkiego.

Wspomniane wyżej jądra uranu, jak i toru przechodzą długi cykl rozpadów promieniotwórczych. Np. izotop uranu, ^{238}U , ośmiokrotnie rozpada się na drodze rozpadu α i sześciokrotnie na drodze rozpadu β zanim stanie się stabilnym izotopem ołowiu-206, a tor-232 przechodzi sześć rozpadów typu α i cztery typu β nim przekształci się w stabilny ołów-208. W obu tych łańcuchach rozpadu tworzą się izotopy gazu szlachetnego – radonu, które - dyfundując poprzez glebę i szczeliny skalne - wydostają się na zewnątrz złoża i mieszają się z powietrzem, którym oddychamy. Ze względu na czasy życia izotopów radonu, w zasadzie tylko jeden z nich, ^{222}Rn , (o półokresie rozpadu 3,8 dnia), wnosi istotny wkład do dawki pochodzącej od źródeł naturalnych. Chociaż radon jest słabo rozpuszczalny w wodzie, a więc

³ A.Bouville, W.M.Lowder, Radiat. Prot. Dosim. 24 (1988) 293

morza i oceany zawierają go stosunkowo niewiele, przy wypompowywaniu wody z głębokich podkładów łatwo może się zdarzyć, że wiele tego gazu wydostanie się na zewnątrz. Być może więc ciesząc się kąpielą pod prysznicem (w domku z indywidualnym ujęciem wody) właśnie w tym momencie znajdujemy się pod zwiększonym wpływem promieniotwórczego radonu. W niektórych oszacowaniach podaje się, że 6-12% wszystkich przypadków zachorowań na raka płuc pochodzi właśnie z działania radonu, przy czym groźny jest nie tyle sam gaz, lecz produkty jego rozpadu, jakimi są jony polonu, bizmutu czy ołowiu. Te, będąc elektrycznie naładowanymi, przyczepiają się do cząsteczek kurzu, są wdychane przez nas i osadzają się w płucach. Będąc tam i rozpadając się dalej, wysyłają do tkanki płucnej i w jej okolicy jonizujące tkankę produkty rozpadu. W ocenie dawek pochodzących od różnych naturalnych źródeł promieniowania jonizującego szacuje się, że udział pochodzący od radonu wynosi ok. 55% średniej dawki (w Polsce jest to ~2,4 mSv/rok) otrzymywanej przez człowieka.



Rys. 13.3 Rozkład dawki w Polsce⁴ na poszczególne składowe (%) w 2004 r.
W składowej promieniowanie sztuczne większość (25,4%) to diagnostyka medyczna.

Na uwagę zasługuje też izotop ^{40}K o okresie połowicznego zaniku $1,28 \cdot 10^9$ lat. Ze względu na ten czas, jego obecna ilość w Ziemi stanowi zaledwie kilka procent pierwotnej. Zresztą, patrząc na czasy życia izotopów rozpoczynających każdą rodzinę widać, że w chwili formowania się Ziemi poziom promieniowania musiał być kilkakrotnie wyższy niż obecnie. W Tabeli 13.1 przedstawiamy⁵ koncentrację niektórych izotopów promieniotwórczych w kilku rodzajach skał i gleb. Jak się okazuje, pewne łupki bitumiczne zawierają nawet do 4500 Bq/kg ^{226}Ra . Od miejsca do miejsca na Ziemi koncentracja pierwiastków promieniotwórczych zmienia się. W niektórych obszarach Brazylii, Indii i Iranu koncentracja ^{232}Th może być 10 – 100 razy wyższa niż średnia na kuli ziemskiej. Rozkład dawki, otrzymywanej przez mieszkańca Polski, na poszczególne składowe pokazuje rys. 13.3 oraz Tabela 13.2.

⁴ CLOR: Annual Report (2006)

⁵ za T.Henriksen i H.D.Maillie, *Radiation & Health*, Taylor&Francis (2003)

Tabela 13.1 Koncentracja izotopów promieniotwórczych [w Bq/kg] w niektórych skałach i glebach w Skandynawii.

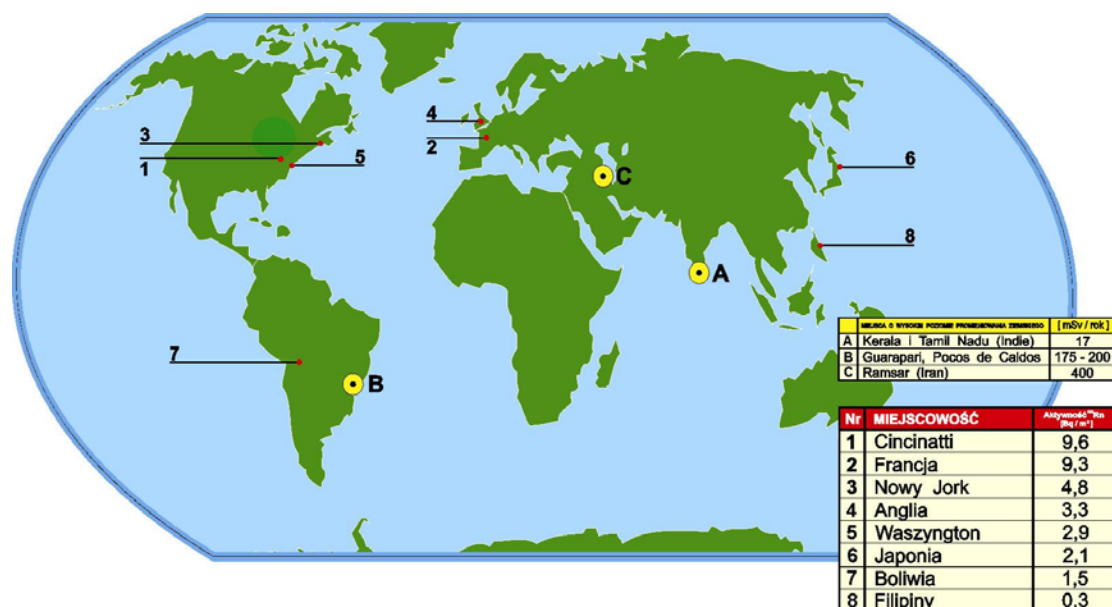
Rodzaj skały/gleby	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Granit	20 - 120	20 - 80	600 – 1800
Granit bogaty w tor i uran	100 - 500	40 - 350	1200 – 1800
Gnejs	20 - 120	20 - 80	600 – 1800
Piaskowiec	5 - 60	4 - 40	300 – 1500
Wapień	5 - 20	1 - 10	30 – 150
Gleba bogata w łupki bitumiczne	100 - 1000	20 - 80	600 – 1000
Gleba morenowa	20 - 80	20 - 80	900 – 1300
Glina	20 - 120	25 - 80	600 – 1300

**Tabela 13.2 Średnia dawka dla Polski w/g źródeł CLOR w r. 1996.
W nawiasach podano dane za rok 2004**

Źródła promieniowania	Dawka [mSv]	Procent dawki [%]
Naturalne źródła promieniowania:	(2,477)	(74,1)
<i>Radon z szeregów U</i>	1,420 (1,361)	40,5 (40,7)
<i>Toron (radon z szeregu Th)</i>	0,080 (0,101)	2,3 (3,0)
<i>Promieniowanie gamma (gleby i skały):</i> potas ⁴⁰ K	0,120	3,4
szereg uranowy U	0,130	3,7
szereg torowy Th	0,210	6,0
Łącznie promieniowanie gamma	0,460 (0,462)	13,1 (13,9)
<i>Ciało ludzkie:</i>	(0,269)	(8,0)
potas ⁴⁰ K	0,170	4,85
szereg uranowy U	0,055	1,57
szereg torowy Th	0,007	0,20
Inne	0,015	0,43
<i>Pierwotne promieniowanie kosmiczne</i>	0,380 (0,284)	10,84 (8,5)
Izotopy wytworzone przez promieniowanie kosmiczne	0,010	0,29
Źródła wytworzone przez człowieka :		
Badania radiologiczne	0,700 (0,850)	20,00 (23,9)
Medycyna jądrowa	0,080 (0,050)	2,30 (1,5)
Wyroby przemysłowe	0,100	2,90
Odpady promieniotwórcze	0,020	0,6
Awaria w Czarnobylu	0,005 (0,006)	0,14 (0,2)
Energetyka jądrowa ^{*)}	0,002 (0,003)	0,06 (0,1)
RAZEM	3,504 (3,34)	100,00 (100,0)

^{*)} W roku 2004 podano wielkość opadu promieniotwórczego z wybuchów jądrowych

Łączna średnia radioaktywność każdego kilometra kwadratowego skorupy ziemskiej może być oceniana na 1 Ci, tj. $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq. Przekładając aktywność na język dawek promieniowania, średnia dawka roczna przypadająca na mieszkańca wynosi ok. 2,5 mSv, przy czym średnia dawka pochodząca od promieniowania skorupy ziemskiej wynosi na ogół 0,3 do 0,6 mSv rocznie. Na świecie można znaleźć jednak wiele obszarów, w których poziom promieniowania jest znacznie wyższy i może wynosić aż kilkaset milisiwertów rocznie, patrz rys. 13.4. I tak, w prowincji Kerali i Tamil Nadu w Indiach, w pasie o szerokości 500 m i długości 250 km, około 70 tysięcy mieszkańców tego pasa otrzymuje kilkadziesiąt razy wyższe dawki niż ludność żyjąca poza tym obszarem⁶. Złoża monacytu można spotkać także na niektórych plażach w Brazylii, gdzie zamieszkała tam ludność (i turyści!) otrzymują dawki do 100 razy większe od dawek „normalnych”. W mieście Ramsar w Iranie, z powodu bijących tam źródeł wody bogatej w rad (^{226}Ra) można mieć nawet do czynienia z dawkami niemal tysiąckrotnie większymi od normalnych. Nie stwierdzono jednak dotąd, aby osoby zamieszkujące na obszarach o tak znacznie podwyższonym poziomie promieniowania wykazywały większą niż inni skłonność do zachorowań na choroby nowotworowe, czy też, aby częstotliwość mutacji komórek była tam większa niż gdzie indziej.

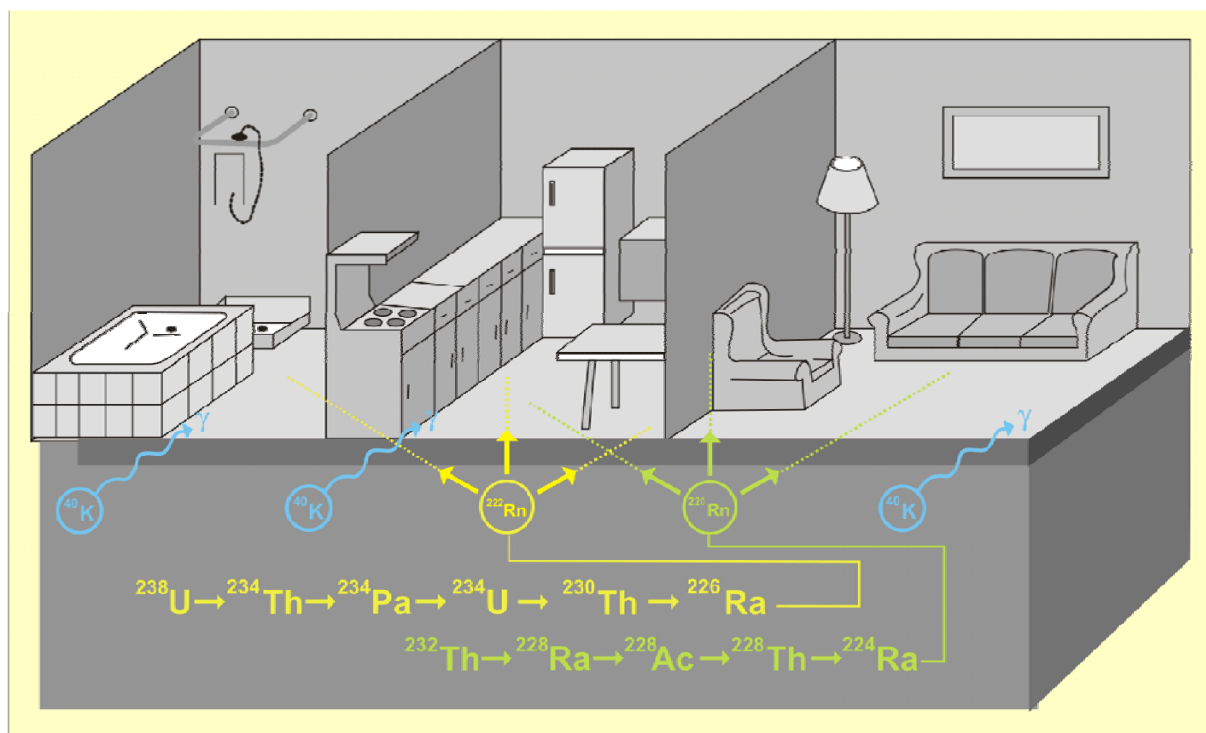


Rys. 13.4 Obszary o silnie podwyższonym poziomie promieniowania naturalnego

Niewielkie ilości pierwiastków promieniotwórczych znajdują się w węglu, w dymie i popiele, pochodzących ze spalania węgla. Produkty spalania, typowe dla konwencjonalnych elektrowni węglowych osadzają się w glebie, przenikają do roślin i wreszcie trafiają do przewodów pokarmowych zwierząt i ludzi. Energia pochodząca ze źródeł geotermalnych też nie jest wolna od problemu promieniotwórczości, bowiem w wodzie z tych źródeł znajduje się dość pokaźna domieszka nuklidów promieniotwórczych. Powszechnie stosowane nawozy fosforowe (fosfatowe), do wytwarzania których używane są odpowiednie skały, zawierają spore domieszki pierwiastków z szeregu uranowego. W procesach wydobywania rud uranowych,

⁶ Wysoki poziom promieniowania związany jest ze złożami monacytu – fosforanu ziem rzadkich, zawierającego promieniotwórcze izotopy tych pierwiastków

ale nie tylko tych, górnicy narażeni są także na podwyższone stężenia promieniotwórczego radonu. Typowe aktywności powietrza wynikające ze stałej obecności radonu w środowisku (rys. 13.5) podane są w Tabeli 13.3⁷. W domach drewnianych aktywność radonu jest podobna jak na zewnątrz, gdyż większość promieniowania pochodzi z materiałów budowlanych piwnicy, a poziom gruntu jest tuż obok. Jednak w domach zbudowanych z betonu, sytuacja może być inna, szczególnie jeśli beton jest wykonany z materiałów innych niż znajdujących w najbliższym otoczeniu domu. Czasem też zawartość uranu w materiałach budowlanych jest wysoka, co wpływa na podwyższenie poziomu radonu wewnątrz domu. Od domu do domu moc dawki od radonu może zmieniać się w granicach 30% (od ok. 0,9 mGy/rok do ok. 1,3 mGy/rok). Średnia dawka roczna od alfa-promieniotwórczego radonu (^{222}Rn), to 1 – 3 mSv. Jak wspominaliśmy, wchłanianie tego gazu jest groźne ze względu m.in. na pochodne radonu ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi (ciężkie metale o czasach życia rzędu minut) i ^{214}Po ($T_{1/2} = 164 \mu\text{s}$). Po wchłonięciu usadwiają się w oskrzelach. Produkty rozpadu radonu mogą łączyć się z cząstkami kurzu i dostać przy inhalacji do płuc. Zasadnicza dawka pochodzi ostatecznie od obu ww. izotopów polonu.



Rys. 13.5 Gazowy radon (dwa izotopy! Okresy połowicznego zaniku ^{222}Rn i ^{220}Rn wynoszą odpowiednio 3,8 dnia oraz 55 s) jest stale obecny w naszych pomieszczeniach. Znaczny wkład do dawki wnosi też promieniotwórczy ^{40}K .

⁷ G.Marx, w „Atoms in our hands”, Roland Eötvös Physical Society, Budapest (1995), str. 51

Tabela 13.3 Aktywności radonu w naszym otoczeniu

Miejsce pomiaru	Aktywność [Bq/m ³]
Powietrze przy gruncie	10
Wietrzony pokój	40
Pokój zamknięty	80
Piwnica	400
Pieczara	10000
Odwierty o wysokiej aktywności	100000

13.2.3 Promieniowanie wewnętrzne

Dawka około 0,3 – 0,4 mSv pochodzi od nuklidów promieniotwórczych znajdujących się w nas samych. Spośród nich należy wymienić przede wszystkim następujące: ^{14}C i tryt (^3H), które stale tworzone przez promieniowanie kosmiczne w górnych warstwach atmosfery ziemskiej stają się następnie składnikiem poszczególnych ogniw łańcucha pokarmowego, potas ^{40}K , wchłaniany przez nas z naturalnym potasem, oraz ^{87}Rb . Spożywając ryby morskie i tzw. owoce morza, zawierające pewne ilości ^{210}Pb i ^{210}Po , do naszych organizmów dostarczamy i te dwa izotopy promieniotwórcze. Mięso niektórych zwierząt zawiera także pewne ilości pierwiastków promieniotwórczych, jak ^{210}Po u renów, czy uran u kangurów i owiec w Australii. Należy zwrócić uwagę, iż polon jest jednym z produktów rozpadu promieniotwórczego radonu z szeregu uranowego. ^{210}Po jest emitерem alfa, który po zainhalowaniu staje się groźny ze względu na jego wysoką aktywność właściwą. W ciele około 10% tego izotopu usadawia się w wątrobie, 10% w nerkach i 10% w śledzionie. Pozostałe 70% rozproszonych jest w miarę jednorodnie po całym organizmie. Również palacze tytoniu mają większy kontakt z tym izotopem, gdyż znajduje się on w liściach tytoniu. Z wymienionych tu nuklidów najważniejszym jest potas-40 o nadzwyczaj długim półokresie rozpadu, aż 1,28 miliarda lat. Choć ten radionuklid pojawia się w naturalnym potasie w minimalnych ilościach, zaledwie 117 atomów na każdy milion atomów naturalnego potasu, wystarcza to, aby w ciele osobnika o wadze 70 kg następowało około 4000 przemian beta na sekundę. Oprócz łatwo przyswajalnego potasu, nasz organizm przyswaja uran, stront, rad i tor, spośród których ^{226}Ra , obecny zarówno w glebie jak i wodzie, prowadzi do największej liczby rozpadów promieniotwórczych w naszych organizmach. Dzieje się tak dlatego, że pierwiastek ten jest podobny chemicznie do wapnia i baru, które są szczególnie łatwo wchłaniane. Szczególnym radionuklidem naświetlającym nas od wewnątrz jest węgiel ^{14}C , pochodzenia kosmicznego, mający półokres rozpadu 5730 lat. Tworzy się on w wyniku reakcji jądrowych protonów z jądrami azotu i jest łatwo wchłaniany przez organizmy żywe. Gdy organizm umiera, wchłanianie tego węgla ustaje. Typowy dorosły ma w sobie tyle ^{14}C , że zachodzi w nim około 4000 rozpadów beta na sekundę, podobnie jak w przypadku potasu. Różnicę między promieniowaniem tych dwóch radionuklidów określa jednak energia promieniowania, która w przypadku przemiany β izotopu ^{14}C wynosi 156 keV (wtedy średnia energia promieniowania β wynosi 49,5 keV), podczas gdy przemianom β izotopu ^{40}K towarzyszy promieniowanie β o średniej⁸ energii 455 keV lub opuszczające nasze ciało promieniowanie γ o energii 1,46 MeV (emitowane w procesie wychwyty elektronu). Izotopy

⁸ Przypominamy, że proces rozpadu β jest procesem trzyciałowym, w którym oprócz cząstki β występuje też neutrino. W związku z tym należy odróżniać całkowitą energię przemiany od energii emitowanej cząstki β .

^3H , ^{14}C i ^{87}Rb wysyłają miękkie promieniowanie beta, o średniej energii $<100\text{ keV}$, łatwo pochłaniane wewnątrz ciała człowieka, patrz Tabela 13.4.

Tabela 13.4. Nuklidy promieniotwórcze zawarte w ciele ludzkim [dane dla tzw. "umownego człowieka"*] oraz podstawowe charakterystyki emitowanego promieniowania

Izotop	Liczba atomów	Liczba rozpadów [Bq]	Przemiana	Energia rozpadu [keV]	Energia średnia $\langle E_\beta \rangle$ [keV]	Orientacyjny zasięg w tkance dla $\langle E_\beta \rangle$ [μm]
^3H	$4,2 \times 10^{10}$	75	β	19	5,7	0,5
^{14}C	7×10^{14}	2690	β	156	49,5	39
^{40}K	$2,5 \times 10^{20}$	4340	β	β 1312 γ 1461	455	1600
^{87}Rb	$1,4 \times 10^{21}$	625	β	274	82	95

* dla celów naukowych i statystycznych wymyślony został tak zwany "umowny człowiek" – ang. "reference man" – waga 70 kg, wzrost 175 cm, pracujący 40 godz. / tydzień, dieta : ok. 1,5 kg suchej żywności + 1,2 litra płynów, oddychanie: 20 m³ powietrza na dobę przy umiarkowanym wysiłku fizycznym

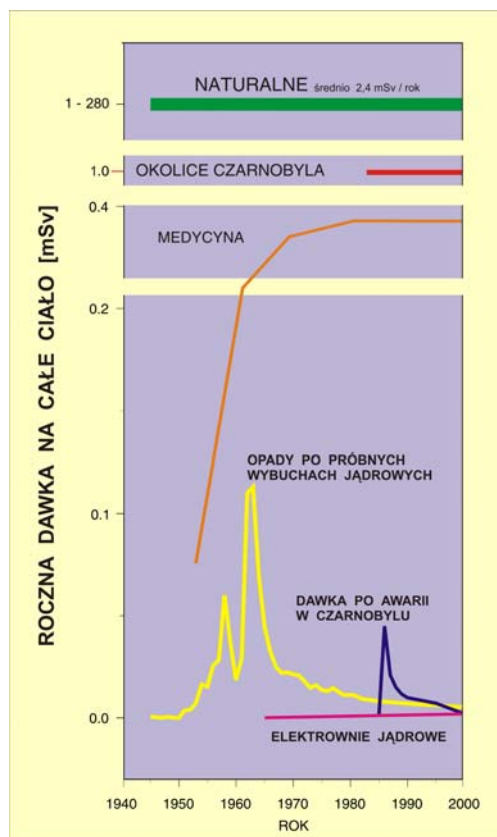
13.3 Typowe aktywności i dawki, z którymi mamy do czynienia

Ponieważ nasze środowisko promieniuje, warto wiedzieć, z jakimi typowymi aktywnościami mamy lub możemy mieć do czynienia. Aktywności te przedstawiamy w Tabeli 13.5, zawierającej również aktywność zeszlonego, wysokoaktywnego odpadu promieniotwórczego, powstałego po przerobieniu wypalonego paliwa.

Jak widać, w życiu mamy do czynienia z materiałami o aktywnościach zmieniających się o rzędy wielkości, jednak gdyby kierować się tylko tymi wielkościami moglibyśmy np. nie chcieć zainstalować w domu czujnika dymu, świetlnych znaków, nie mówiąc już o poddawaniu się badaniom medycznym. Dlatego też, oprócz aktywności należy wiedzieć skąd się ta aktywność wywodzi i w jaki sposób może ona ewentualnie zakłócić pracę naszego organizmu. Czujnik dymu, zawierający izotop ameryku, będącego emitorem promieniowania α o bardzo krótkim zasięgu w powietrzu nie szkodzi nam w żaden sposób jeśli jest zawieszony pod sufitem, podobnie znak świetlny mimo jego bardzo wysokiej aktywności. Promieniowanie z wysokoaktywnego źródła dla terapii może nas skutecznie wyleczyć, podczas gdy przebywanie w pobliżu wysokoaktywnego odpadu promieniotwórczego o dziesięciokrotnie mniejszej aktywności może nam poważnie zaszkodzić. Aktywność rudy uranowej może zmieniać się w stosunkowo dużych granicach, a aktywność kilograma czystego uranu może być mniejsza niż aktywność 1 kg rudy uranowej ze względu na zawarte w rudzie krótkożyciowe produkty rozpadu promieniotwórczego. Z tego właśnie względu nie tyle aktywność, ile inna cecha źródła promieniotwórczego, jest dla nas bardziej interesująca.

Tab. 13.5 Aktywności typowych promieniotwórczych źródeł naturalnych⁹

Źródło	Aktywność [Bq]
„Człowiek umowny”	$8 \cdot 10^3$
1 kg kawy	$1 \cdot 10^3$
1 kg nawozu superfosfatowego	$5 \cdot 10^3$
Radon w powietrzu w pomieszczeniu o powierzchni 100 m ²	$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$
Czujka dymu	$3 \cdot 10^4$
Radiofarmaceutyk dla diagnostyki medycznej	$7 \cdot 10^7$
Źródło izotopowe dla terapii	$1 \cdot 10^{14}$
1 kg 50 - letniego, zeszlonego wysoaktywnego odpadu promieniotwórczego	$1 \cdot 10^{13}$
Świetlny znak wyjścia (z lat 1970.)	$1 \cdot 10^{12}$
1 kg metalicznego uranu	$25 \cdot 10^6$
1 kg kanadyjskiej rudy uranowej	$25 \cdot 10^6$
1 kg australijskiej rudy uranowej	$0,5 \cdot 10^6$
1 kg niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych	$1 \cdot 10^6$
1 kg popiołu po spaleniu węgla	$2 \cdot 10^3$
1 kg granitu	$1 \cdot 10^3$



Na rys. 13.6 autorstwa Z.Jaworowskiego¹⁰ pokazujemy, w jaki sposób kształtowały się dawki na całe ciało w erze atomu, tj. po roku 1950. Przede wszystkim rzuca się w oczy wzrost udziału procedur medycznych – widomy dowód rozwoju medycyny nuklearnej i radioterapii, ale także i różnego rodzaju badań rutynowych, jak procedury badań rentgenowskich. Przy średniej wartości 2,4 mSv na rok, medycyna wnosi dziś nieco mniej niż 0,4 mSv, a największe różnice odnotowujemy w poziomie promieniowania naturalnego. Na tym tle, zaskakująco niewielki wkład do ogólnoświatowej średniej wniosły próby jądrowe, szczególnie intensywne w latach 1950-1960, jeszcze mniejsza dawka średnia związana jest z wypadkiem w elektrowni jądrowej w Czarnobylu, natomiast wkład od energetyki jądrowej jest ledwie zauważalny. Tej sprawie jednak poświęcimy rozdz. XV.

Rys. 13.6 Średnie roczne dawki na całe ciało z różnych źródeł w funkcji lat

⁹ <http://www.world-nuclear.org/education/ral.htm>

¹⁰ Na podstawie danych UNSCEAR'2000