

Metody i Technologie Jądrowe w Środowisku, Przemysle i Medycynie

Wpływ promieniowania naturalnego na zdrowie człowieka

Autor:

Judyta Salamon

Prowadzący: prof. dr hab. Jan Pluta

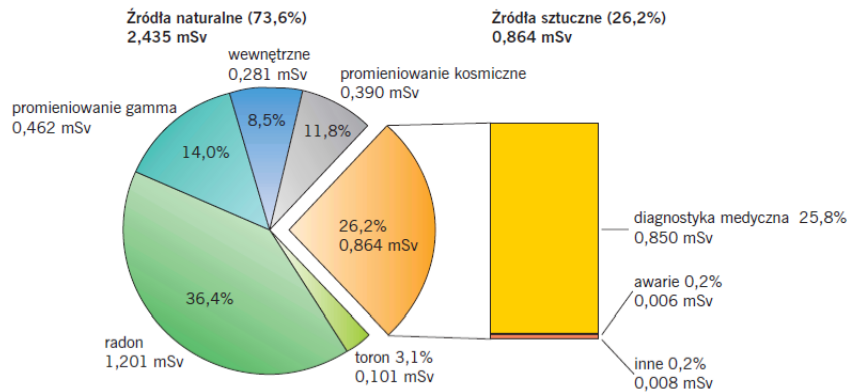
Warszawa, 21 stycznia 2014

Spis treści

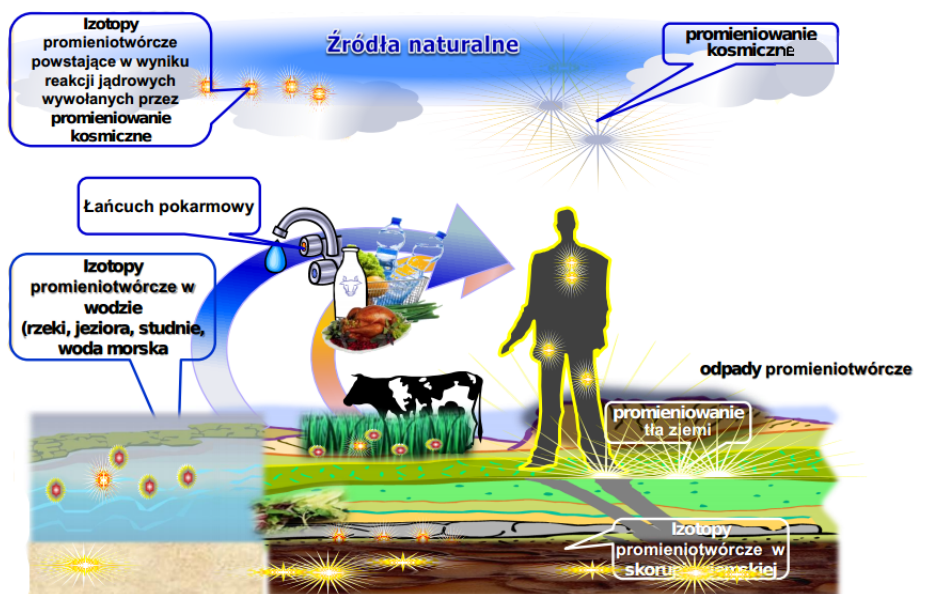
1	Wstęp	2
2	Promieniowanie jonizujące	3
2.1	Rodzaje promieniowania	3
2.2	Osłony przed promieniowaniem	4
3	Źródła promieniowania naturalnego	5
3.1	Promieniowanie kosmiczne	5
3.1.1	Skład promieniowania kosmicznego	5
3.1.2	Od czego zależy natężenie promieniowania kosmicznego	5
3.1.3	Wielkie pęki atmosferyczne	7
3.1.4	Promieniowanie pierścieniowe Ziemi	8
3.2	Promieniowanie skorupy ziemskiej	10
3.3	Radon i jego pochodne	13
3.3.1	Właściwości fizyczne	13
3.3.2	Jak radon dostaje się do domów?	13
3.3.3	Zawartość radonu promieniotwórczego w wodzie	14
3.3.4	Promieniowanie radonu na świeżym powietrzu	15
3.4	Radionuklidy zawarte w organizmie człowieka	15
3.5	Radionuklidy w produktach spożywczych	16
4	Promieniowanie naturalne wzmożone przez człowieka	17
4.1	Odpady kopalniane	17
4.2	Materiały budowlane	18
4.3	Inne zastosowania	20
5	Podsumowanie	21

1 Wstęp

Promieniowanie jonizujące towarzyszy gatunkowi ludzkiemu od zawsze, stanowi i stanowiło element naszego naturalnego otoczenia. Dociera do nas ze wszystkich stron: z kosmosu, przenikając atmosferę, dachy i sufity, z podłoża – zarówno z wyłożonego betonowymi płytami chodnika, jak i z bazaltowych płyt górskiej ścieżki. Promieniuje siedzący obok nas człowiek, substancje promieniotwórcze zawarte są w otaczającym nas powietrzu i wodzie. Każdego dnia miliony cząstek naturalnego promieniowania jonizującego przenika nasze ciało. Kiedyś jego natężenie było znacznie większe, średnia dawka roczna była większa od obecnej co najmniej kilkanaście razy, a maksymalne wartości, w których rozwijał się nasz gatunek, wymusiły powstanie mechanizmów obronnych i naprawczych dla struktur biochemicznych w naszych komórkach. Mechanizmy tego rodzaju bronią nas przed szkodliwym działaniem wielu innych czynników naturalnych w naszym otoczeniu. Obecnie średnia dawka roczna promieniowania pochodzącego ze źródeł naturalnych wynosi ok. 2,4 mSv. Wokół podanej średniej rozrzut jest bardzo duży. Wahania tła powodowane głównie różnicami w zawartości radonu w glebie, wynoszą typowo od 1 do 10 mSv/rok [22]. Polska znajduje się w obszarze średnich dawek, choć i na obszarze naszego kraju są istotne różnice – rzędu 0,6 mSv dla samej tylko dawki promieniowania gamma od tła naturalnego. Gdyby dołączyć tu wpływ radonu, moglibyśmy uzyskać różnice nawet kilkakrotnie większe w obrębie tej samej miejscowości, a nawet ulicy [18].



Rysunek 1: Źródła i wielkość narażenia [1]



Rysunek 2: Źródła promieniowania jonizującego w naszym środowisku [19]

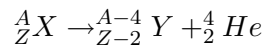
2 Promieniowanie jonizujące

Źródła promieniowania jonizującego dzieli się na naturalne i sztuczne. Promieniowanie jonizujące pochodzące ze źródeł naturalnych stale oddziałuje na człowieka i jego środowisko. Przenika na Ziemię z kosmosu. Jego źródłem są także naturalne substancje promieniotwórcze znajdujące się w skorupie ziemskiej, materiałach budowlanych, wodzie, powietrzu, żywności, a także w naszym organizmie. Na człowieka oddziałuje również promieniowanie jonizujące ze źródeł sztucznych. Należą do nich aparaty rentgenowskie (promieniowanie X), tzw. bomby kobaltowe (promieniowanie gamma), reaktory jądrowe (promieniowanie X, gamma, neutrony), akceleratory i sztuczne izotopy promieniotwórcze (promieniowanie alfa, beta, gamma) wykorzystywane w medycynie i gospodarce lub uwalniane do środowiska w wyniku prób jądrowych albo awarii jądrowych.

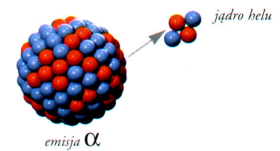
2.1 Rodzaje promieniowania

Promieniowanie można podzielić ze względu na sposób jonizacji. Promieniowanie jonizujące materię bezpośrednio to strumień cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym jonizujących głównie przez oddziaływanie kulombowskie. Może to być m. in.

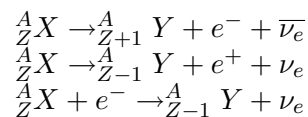
- Promieniowanie alfa (α) - emisja cząstki alfa:



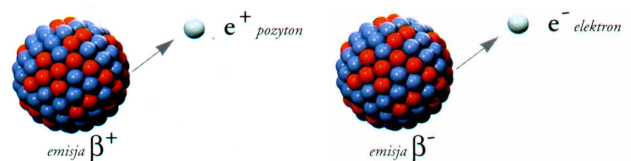
Podczas rozpadu alfa następuje emisja strumienia jąder atomów helu; cząstki (α) to stabilna struktura składająca się z 2 protonów i 2 neutronów. Promieniowanie alfa towarzyszy jedynie przemianom jąder ciężkich, takich jak: (U), (Th) i (Ra). Jądra tych atomów są niezmiernie bogate w neutrony (posiadają ich dużo więcej niż protonów).



- Promieniowanie beta (β) - emisja elektronu, pozytonu lub wychwyt elektronu:

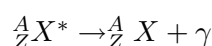


Rozpad beta jest procesem, podczas którego z jądra radioaktywnego atomu następuje emisja elektronu lub pozytonu wraz z jednoczesną emisją cząstki zwanej antyneutrinem elektronowym lub neutrinem elektronowym. Neutrino i antyneutrino są cząstkami praktycznie nie posiadającymi masy, ale podczas emisji unoszą ze sobą część energii wyzwolonej podczas procesu rozpadu.

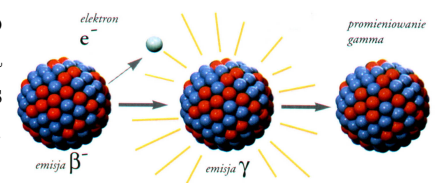


Promieniowanie jonizujące pośrednio to promieniowanie składające się z obiektów nieposiadających ładunku elektrycznego. Jonizuje ono materię poprzez inne oddziaływania np. efekt fotoelektryczny, rozpraszanie komptonowskie czy kreację par elektron - pozyton. Najważniejsze przykłady to:

- Promieniowanie gamma (γ) - emisja kwantu gamma ze wzbudzonego jądra:



Ten typ promieniowania jest falą elektromagnetyczną tak jak światło tylko o znacznie wyższej energii. Podobnie jak kwanty promieniowania widzialnego kwanty gamma nie posiadają masy ani ładunku. Podczas tej przemiany jest emitowany kwant gamma ze wzbudzonego jądra. Liczba protonów i neutronów pozostaje niezmienną.



- Promieniowanie neutronowe - polega na uwolnieniu energii z atomu w formie neutralnych elektrycznie, choć obarczonych względnie sporą masą cząstek. Neutrony mogą być emitowane podczas reakcji rozszczepienia jąder atomowych oraz w procesie rozpadu niektórych radionuklidów. Ogromnym źródłem naturalnego promieniowania neutronowego jest promieniowanie kosmiczne, jak i jądra powstałe w procesach rozpadu alfa. Sztuczne źródło emisji neutronów to przede wszystkim reaktory i akceleratory.

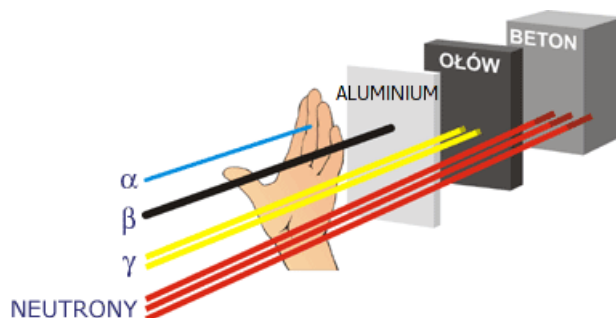
2.2 Osłony przed promieniowaniem

Promieniowanie alfa nawet w powietrzu ma bardzo mały zasięg (kilka centymetrów zależnie od energii, szybko traci energię) i nie wymaga stosowania dodatkowych osłon.

Zasięg **promieniowania beta** w powietrzu jest rzędu metrów i zależy od energii elektronów, zatem stosowanie osłon jest konieczne. Jednak nie nadają się na nie materiały ciężkie jak ołów, pomimo niewielkiej ich grubości koniecznej do zatrzymania elektronów. Razem z liczbą atomową materiału rośnie prawdopodobieństwo emisji promieniowania hamowania przez zatrzymywane elektrony. Przekrój czynny na to zjawisko rośnie proporcjonalnie do kwadratu liczby atomowej. Osłona wykonana z ołowiu zatrzyma elektrony, jednak stanie się źródłem wtórnego promieniowania rentgenowskiego, przed którym należałoby się dodatkowo osłaniać. Jako materiały osłonowe przed promieniowaniem beta stosuje się więc materiały lekkie, typowymi są szkło organiczne, inne tworzywa sztuczne, szkło zwykłe, aluminium.

Promieniowanie gamma, w odróżnieniu od cząstek alfa i beta nie ma zasięgu maksymalnego w żadnym materiale. Stosowana osłona zgodnie z prawem pochłaniania osłabia wiązkę tym bardziej im jest grubsza. Tak materiały lekkie jak i ciężkie są w stanie zapewnić daną krotność osłabienia, różnić się będą jednak grubością. Przekroje czynne na różne rodzaje oddziaływania promieniowania gamma z materią zależą od liczby atomowej, zatem im cięższy materiał stosowany na osłony – tym mniejsza jego wymagana grubość dla zapewnienia danej krotności osłabienia. Typowymi materiałami osłonowymi są ołów, uran zubożony, stal, beton.

Neutrony ze względu na energię można podzielić na dwie grupy: prędkie oraz termiczne. Przed neutronami termicznymi można się łatwo osłonić umieszczając na ich drodze materiał o dużym przekroju czynnym na ich absorpcję, taki jak kadm czy bor. W przypadku neutronów prędkich ze względu na zależność oddziaływania od energii oraz powstawanie wielu rodzajów promieniowań wtórnych trudno zbudować skuteczną osłonę przed nimi. Dlatego też stosuje się układ dwustopniowy, w którym najpierw neutrony prędkie zostają spowolnione do energii termicznych a następnie wychwycone przez materiały pochłaniające neutrony termiczne. Dobrymi spowalniaczami (moderatorami) neutronów są materiały o niskich liczbach atomowych (im bardziej zbliżona masa jądra moderatora do masy neutronu tym większa strata energii neutronu przy zderzeniu). Stosuje się materiały bogate w wodór, jak parafinę czy węgiel (grafit). Należy pamiętać, że sama osłona staje się źródłem promieniowania gamma. Stosuje się dlatego trzecią warstwę materiału osłonowego mającego za zadanie absorpcję powstałych kwantów promieniowania gamma.



Rysunek 3: Osłony przed promieniowaniem [23]

3 Źródła promieniowania naturalnego

3.1 Promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie kosmiczne to wysokoenergetyczne promieniowanie przybywające do Ziemi z przestrzeni kosmicznej.



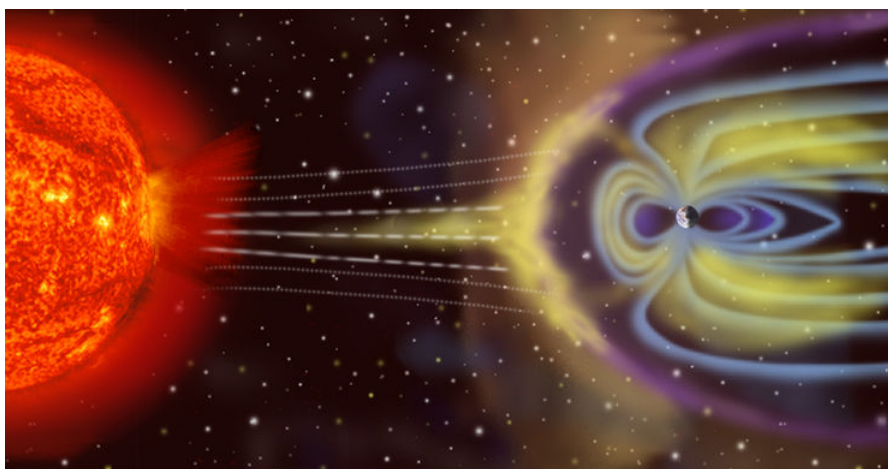
Rysunek 4: Promieniowanie kosmiczne wkraczające do atmosfery ziemskiej [15]

3.1.1 Skład promieniowania kosmicznego

Promienie pierwotne to strumień cząstek o prędkościach zbliżonych do prędkości światła, przybywający z przestrzeni kosmicznej do górnych warstw atmosfery. Powstaje w wyniku rozbłysków słonecznych i prawdopodobnie wybuchów supernowych. Na granicy atmosfery strumień cząstek pierwotnych wynosi ok. 10^4 cząstek/ $m^2 \cdot s$ [3]. Prawie 90% promieniowania pierwotnego to protony, około 9% stanowią cząstki alfa. Liczba elektronów to ok. 1% [4]. Istnieje także niewielka część cięższych cząstek. Średnia energia cząstek pierwotnych wynosi 10^{10} eV a energie pojedynczych cząstek dochodzą do 10^{19} eV. Skład promieniowania kosmicznego i jego widmo dostarcza informacji o procesach zachodzących w kosmosie.

3.1.2 Od czego zależy natężenie promieniowania kosmicznego

Natężenie promieniowania kosmicznego zależy od pola geomagnetycznego: minimalne natężenie występuje na równiku magnetycznym, zaś maksymalne w pobliżu biegunów magnetycznych Ziemi.



Rysunek 5: Wpływ pola geomagnetycznego Ziemi na natężenie promieniowania kosmicznego [5]

Natężenie zmienia się w zależności od pojawiania się plam na słońcu i zależy od wysokości terenu względem poziomu morza. Np. na szczycie Mount Everest jest ponad 100 razy większe niż w Trójmieście. Promieniowanie kosmiczne nie stanowi niebezpieczeństwa dla ludzi na powierzchni Ziemi. Za grupę ryzyka zawodowego uznaje się natomiast personel latający towarzystw lotniczych. Grupę zawodowo narażoną stanowią kosmonauci uczestniczący w długich podróżach pozaziemskich.



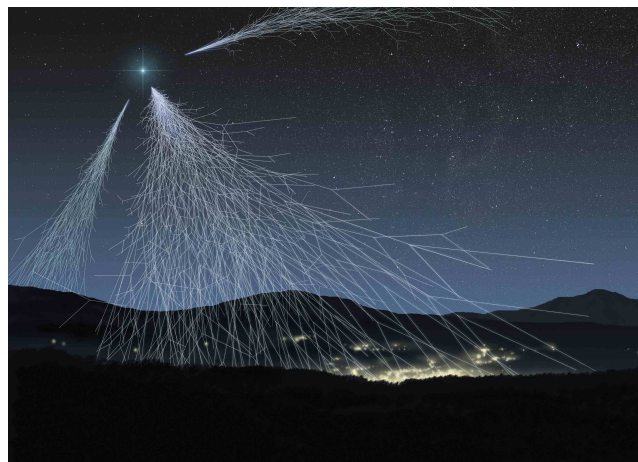
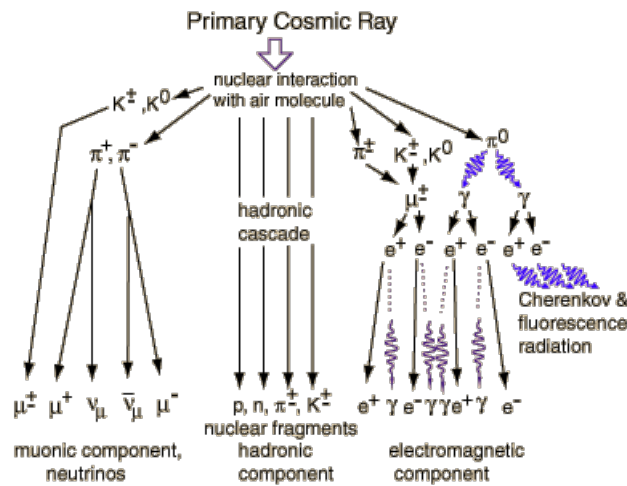
Rysunek 6: Zależność dawki promieniowania od wysokości [20]

Na niskoenergetyczne części widma promieniowania kosmicznego wpływa także aktywność słoneczna: im większa aktywność, tym natężenie jest mniejsze. Jest to zjawisko Forbusha, związane z osłaniającym działaniem wiatru słonecznego, który jest odpowiedzialny m. in. za powstawanie zórz polarnych, obserwowanych głównie w okolicach podbiegunowych. Zjawisko Forbusha polega na tym, że ogólny strumień promieniowania kosmicznego ulega znacznemu zmniejszeniu w okresach burz geometrycznych. Efekt Forbusha tłumaczy się działaniem tzw. butelki magnetycznej, w którym pole magnetyczne jest wzmocnione, odbija dobiegające z zewnątrz cząstki promieniowania kosmicznego. Efekt Forbusha jest jednym z przejawów znaczenia ogólniejszego zjawiska modulacji promieniowania kosmicznego w 11-letnim cyklu aktywności słonecznej. Modulacja ta polega na okresowych zmianach natężenia promieniowania kosmicznego, przy czym wielkość tych zmian zależy od energii promieniowania kosmicznego. Zjawisko modulacji słonecznej jest wynikiem oddziaływania cząstek promieniowania kosmicznego z materią i polem magnetycznym, unoszonymi ze Słońca w postaci tzw. wiatru słonecznego. Cząstki promieniowania kosmicznego, dyfundujące poprzez nieregularności pola magnetycznego w wietrze słonecznym, są wynoszone wraz z tymi nieregularnościami z układu planetarnego. Istniejące teorie tego zjawiska pozwalają przewidzieć w sposób ilościowy osłabienie strumienia promieniowania kosmicznego (zależnie od energii) oraz zmianę widma energetycznego cząstek w wyniku oddziaływania z wiatrem słonecznym [16].

3.1.3 Wielkie pęki atmosferyczne

W wyniku reakcji pierwotnego promieniowania kosmicznego z jądrami atomów gazów atmosferycznych, do Ziemi dociera promieniowanie wtórne. Zderzeniom tych cząstek towarzyszy na ogół rozbicie jąder gazów atmosferycznych i ewentualnie cząstki pierwotnej. Przy takim rozbiciu powstają protony i neutrony, które mają na ogół dostateczne energie, by móc rozbijać kolejne jądra w następnych zderzeniach, oraz unoszące większość energii, krótko żyjące cząstki elementarne: mio-ny, mezony π i hiperony. Właśnie badanie promieniowania kosmicznego spowodowało odkrycie tych cząstek. Jeśli cząstka pierwotna niosła dostatecznie dużo energii, to powstają także pary p-p i n-n (proton-antyproton, neutron-antyneutron). Najobficiej występującymi cząstkami wtórnymi są mezony π , przy czym naładowane żyją dostatecznie długo, by móc oddziaływać jądrowo tak samo jak protony czy neutrony. Tak więc jądrowe oddziaływania w atmosferze na danej wysokości są wywołane wtórnymi protonami, neutronami i mezonami π oraz zachowanymi cząstkami pierwotnego promieniowania kosmicznego.

Jedna wysokoenergetyczna cząstka (zwykle proton) lub kwant promieniowania gamma o energii 10^{20} eV może spowodować powstanie w atmosferze wielkiego pędu atmosferycznego. Do powierzchni Ziemi dociera wówczas cała kaskada cząstek rozprzestrzeniona na dużym obszarze. Badając wielkość tego obszaru, rozkład energii i ilości cząstek, można wnioskować o energii cząstki pierwotnej, która wywołała tę kaskadę.



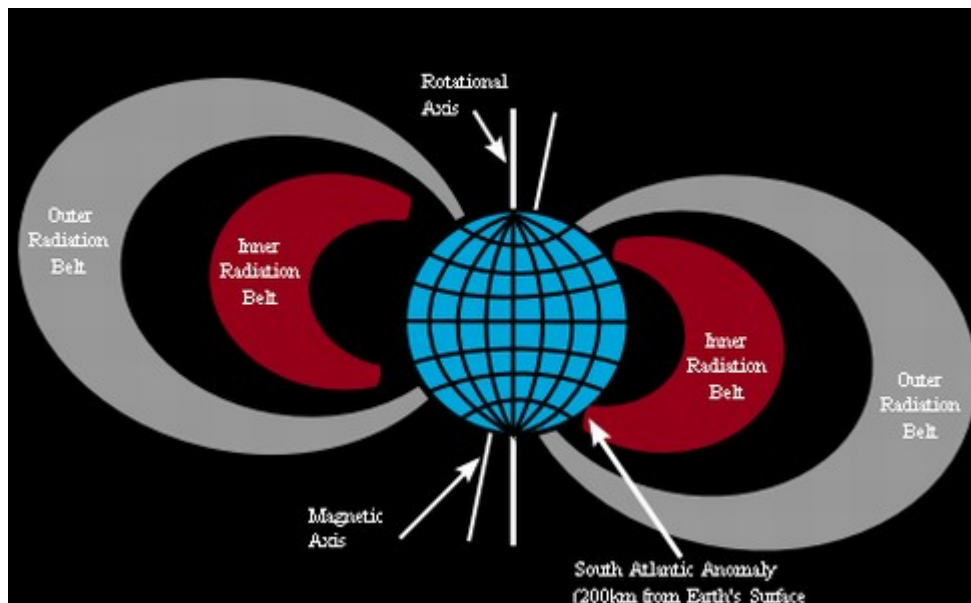
Od góry: schemat wielkiego pędu atmosferycznego [2] i zdjęcie artystyczne [30]

3.1.4 Promieniowanie pierścieniowe Ziemi

Podczas badania promieniowania kosmicznego natrafiono na tzw. pasy Van Allena. Są to strumienie cząstek o energii znacznie mniejszej niż w przypadku promieniowania kosmicznego, schwyte w pałapce pola magnetycznego Ziemi [6]. Ruch ich przebiega po liniach śrubowych. Badania doprowadziły do następujących wniosków: w magnetosferze ziemskiej występują dwa zasadnicze pierścienie radiacyjne. Pierwszy z nich tzw. pierścień wewnętrzny zawierający protony i elektrony zaczyna się na wysokości około 2400 km i kończy się w odległości 5000 km nad powierzchnią Ziemi. Drugi, zewnętrzny pierścień radiacyjny, leży w odległości od 12000 do 20000 km od powierzchni Ziemi i składa się z elektronów i protonów o mniejszych energiach. Trzeci pierścień radiacyjny położony w odległości 50000-60000 km od powierzchni Ziemi składa się z elektronów o energii 200 eV. Zewnętrzne ograniczenie magnetosfery to magnetopauza. Opasuje ona Ziemię w sposób symetryczny, wiatr słoneczny stanowiący tzw. plazmę (mieszanie naładowanych elektrycznie dodatnio i ujemnie cząstek), zderzając się z polem magnetycznym Ziemi wytwarza falę uderzeniową na kształt fali powstającej przy opływie przeszkody przez gaz o prędkości ponaddźwiękowej.

Protonowy pierścień wewnętrzny promieniowania uwięzionego tworzą protony o dużych energiach, zawartych w przedziale kilkudziesięciu do prawie 1000 MeV. Wieniec utworzony przez nie jest bardzo trwały, gęstość strumienia cząstek w jego obrębie nie ulega istotnym wahaniom w okresie całego cyklu zmian aktywności słonecznej. Protony w tym obszarze wewnętrznym są prawdopodobnie pochodzenia wtórnego. Znaczna ich większość jest wyzwalana w wyniku rozpadu neutronów, uwalnianych z atomów atmosferycznych wskutek zderzeń z cząstkami promieniowania kosmicznego pierwotnego.

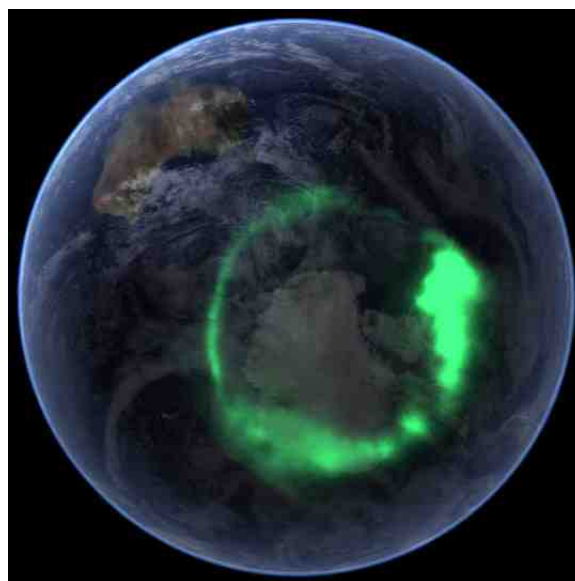
Protonowy pierścień zewnętrzny zawiera protony o energiach od 200 eV do 1 MeV, pochodzące z wiatru słonecznego. Cząstki te występują w odległości od około 6500 km aż do magnetopauzy. Protonom pasa wewnętrznego, o dużych energiach, towarzyszą elektrony, które w pewnej części pochodzą z wspomnianego już rozpadu neutronów wyzwalanych przez promieniowanie kosmiczne.



Rysunek 7: Pasy Van Allena [17]

Uproszczony model powstawania zorzy polarnej

Kiedy wiatr słoneczny dotrze w pobliże Ziemi, oddziałuje z polem magnetycznym Ziemi. Cząstki pochodzące z wiatru słonecznego zostają uwięzione przez ziemskie pole magnetyczne i tworzą pasy van Allena, zwane też pasami radiacyjnymi, ponieważ są one obszarami intensywnego promieniowania. Elektrony i protony, w tych pasach, poruszają się po trajektoriach zbliżonych do spiralnych z ogromnymi prędkościami, w kierunku z bieguna północnego na południowy i z powrotem (jedna sekunda wystarczy na przebycie trasy w obu kierunkach). Na skutek tego elektrony w końcu zderzają się w pobliżu biegunów magnetycznych z cząsteczkami azotu i tlenu wzbudzając je, które wracając do stanu podstawowego wypromieniowują energię w postaci kwantów światła. Zorze występują na wysokości 70-300 km, chociaż czasami sięgają 1000 km. Kolor zorzy zależy od wysokości na której następuje wzbudzenie atomów i od rodzaju atomu. Na ogół jeśli zderzenie następuje z azotem widzimy kolor czerwony i niebieski, jeśli z tlenem zielony i różowy. Kolor żółty jest wynikiem mieszania się barwy zielonej i czerwonej. Gołym okiem zorze dostrzegamy jako zielonkawe i białe bowiem przy słabym świetle oko rejestruje światło przy pomocy pręcików, które nie są wrażliwe na kolory, a jedynie na natężenie czyli ilość światła. Pełne barwy widać dopiero na zdjęciach fotograficznych. Najczęściej zorze widzimy w strefie podbiegunowej. Największe nasilenie zórz występuje w maksimum aktywności Słońca (następują co 11 lat a ostatnie było w 2001 roku). Zorze można wtedy obserwować również w Polsce. Z burzami magnetycznymi i zorzami wiąże się wiele innych zjawisk: wzrost pochłaniania fal radiowych, zaburzenia pola magnetycznego, spadek natężenia promieniowania kosmicznego, ale z drugiej strony lepsze urodzaje w latach maksimum cyklu aktywności (te roczniki win uznaje się za najlepsze), większe przyrosty drzew i cieplejsze lato [30].



Rysunek 8: Zorza polarna zarejestrowana z Ziemi [28] oraz wokół bieguna południowego [29] zarejestrowana przez satelitę NASA

3.2 Promieniowanie skorupy ziemskiej

Skorupa ziemska zawiera naturalne pierwiastki promieniotwórcze rozproszone w skałach i glebie zwykle w bardzo małych stężeniach. Radionuklidy, z uwagi na ich pochodzenie, można podzielić na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią pierwiastki radioaktywne utworzone w okresie formowania się systemu słonecznego. Charakteryzują się długimi okresami połowicznego zaniku, porównywalnymi do czasu istnienia Ziemi wynoszącego około $5 \cdot 10^9$ lat. Do grupy tej zaliczane są także pierwiastki promieniotwórcze pochodzące od pierwiastków, które zapoczątkowują tzw. naturalne szeregi promieniotwórcze. W środowisku Ziemi obecne są pierwiastki promieniotwórcze trzech naturalnych szeregów promieniotwórczych (z czwartego neptunowego izotopy już nie istnieją, występuje jedynie w wyniku sztucznego otrzymywania). Jądra powstające w wyniku przemian jądrowych są często także promieniotwórcze, choć charakteryzują się innym czasem życia. Prowadzi to do tworzenia się tzw. łańcucha lub szeregu promieniotwórczego, złożonego z wielu przemian alfa i beta, a kończącego się na jądrze stabilnym czyli takim, które już dalej się nie rozpada. Naturalne przemiany promieniotwórcze tworzą cztery szeregi, których nazwy pochodzą od nazw pierwszych izotopów danego szeregu. O tym, do którego szeregu należy dany nuklid decyduje jego liczba masowa A . W rozpadzie promieniotwórczym liczba masowa zmienia się o 4 poprzez emisję cząstki α , można to przedstawić wzorem:

$$A = 4n + m$$

gdzie: n – liczba całkowita, m – przyjmuje wartości 0, 1, 2, 3. W ten sposób otrzymuje się 4 szeregi promieniotwórcze:

występujące naturalnie w przyrodzie:

- ($m = 2$) uranowo - radowy $^{238}\text{U} \rightarrow 206\text{Pb}$
- ($m = 3$) uranowo - aktynowy $^{235}\text{U} \rightarrow 207\text{Pb}$
- ($m = 0$) torowy $^{232}\text{Th} \rightarrow 208\text{Pb}$

sztuczny:

- ($m = 1$) neptunowy $^{237}\text{Np} \rightarrow 209\text{Bi}$

We wszystkich trzech naturalnych szeregach promieniotwórczych jest obecny radon: w torowym ^{220}R (toron), w uranowo-radowym ^{222}R , w uranowo-aktynowym ^{219}R (aktynon). Izotopy radonu, ulegając rozpadowi, tworzą osad promieniotwórczy zawierający kolejne pierwiastki promieniotwórcze. Naturalna mieszanina uranu zawiera 99.28% uranu ^{238}U , który jest pierwiastkiem macierzystym szeregu uranowo-radowego, 0.0058% uranu ^{234}U i 0.714% uranu ^{235}U , dającego początek szeregowi uranowo-aktynowemu. Wzajemne stosunki stężeń izotopów uranu w próbkach środowiskowych są najczęściej takie same, jak w jego mieszaninie naturalnej.

Ważnym radionuklidem naturalnym (z uwagi na jego duży udział w ziemskim tle promieniowania jonizującego) jest potas ^{40}K stanowiący ok. 0.01% domieszkę w potasie naturalnym. Potas ^{40}K emituje promieniowanie beta i gamma. Okres jego połowicznego zaniku wynosi 1.32×10^9 lat.

W środowisku ziemskim obecne są w bardzo małych ilościach również inne długo żyjące pierwiastki promieniotwórcze naturalne, jak np. rubid ^{87}Rb , lantan ^{138}La , Samar ^{147}Sm . Druga grupa radionuklidów naturalnych to izotopy promieniotwórcze, powstałe w wyniku reakcji jądrowych zachodzących między cząstkami promieniowania kosmicznego, a jądrami niektórych pierwiastków znajdujących się w powietrzu. W ten sposób powstają: wodór ^3H (tryt), beryl ^7Be , węgiel ^{14}C . Pierwiastki promieniotwórcze naturalne z obu grup są wszechobecne w środowisku Ziemi, dzieje się tak ze względu na bardzo długi okres półtrwania pierwszych członów szeregów promieniotwórczych (^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th) i ciągły proces powstawania izotopów wtórnych. Występują także izotopy promieniotwórcze nazwane geologicznie trwałymi, o okresie połowkowego zaniku ponad 1012 lat. Przykładem może tu być ind ^{115}In , którego po 4 miliardach lat pozostanie w litosferze 99.9995%.

Radionuklidy pochodzenia ziemskiego występujące pojedynczo [20]:

Izotop	Czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ [lat]	Zawartość w pierwiastku naturalnym [%]	Rodzaj promieniowania
^{40}K Potas	$1.3 \cdot 10^9$	0.0118	β, γ
^{50}V Wanad	$6.0 \cdot 10^{14}$	0.25	β
^{87}Rb Rubid	$4.8 \cdot 10^{10}$	27.83	β
^{113}Cd Kadm	$9.0 \cdot 10^{15}$	12.3	β
$^{147}\text{Sm}, ^{148}\text{Sm}, ^{149}\text{Sm}$ Samar	$1.1 \cdot 10^{11}, 8.0 \cdot 10^{15}, > 10^{16}$	15, 11.2, 13.8	α
^{152}Gd Gadolin	$1.1 \cdot 10^{14}$	0.2	α
^{156}Dy Dysproz	$2.0 \cdot 10^{14}$	0.06	α
^{176}Lu Lutet	$2.7 \cdot 10^{10}$	2.6	β
^{174}Hf Hafn	$2.0 \cdot 10^{15}$	0.17	α
^{180}Ta Tantal	$> 5 \cdot 10^{13}$	0.012	β
^{190}Pt Platyna	$7.0 \cdot 10^{11}$	0.013	α
^{204}Pb Ołów	$1.4 \cdot 10^{17}$	1.48	α

W ogródku o wymiarach 20 m x 20 m powierzchniowa warstwa gleby o grubości 1m waży około 600t i zawiera:

(0.6 – 4.2) kg uranu (U)

(0.2 - 6.2) kg toru (Th)

(600 – 16800) kg potasu (K), w tym tylko jego izotop ^{40}K jest promieniotwórczy i stanowi jedynie 0.0117% jego masy, na 1 tonę naturalnego K przypada więc 117 g izotopu ^{40}K . Metrowa warstwa gleby zawiera od 0.07 kg do 1.96 kg promieniotwórczego potasu. Dawka od takiej warstwy gleby z naszego ogródka - Dawka Ogródkowa (DOG) – pochodzi więc od (1 – 12) kg naturalnych radionuklidów [14].

Naturalne pierwiastki promieniotwórcze odgrywają podstawową rolę w bilansie cieplnym Ziemi. Obok toru i uranu promieniotwórczy potas ^{40}K odegrał bardzo ważną rolę w początkowym okresie ewolucji Ziemi. Ilość energii emitowanej podczas jego rozpadu była prawdopodobnie tak duża (bo prawie 12 razy więcej niż teraz), że to właśnie ona spowodowała rozgrzanie Ziemi. Pierwiastki te są głównym źródłem ciepła zasilającego procesy geologiczne Ziemi. Przepływ ciepła zachodzi i pojawia się między innymi w postaci wypływu lawy wulkanicznej, w działaniu gejzerów itp.

Uran naturalnie występujący ma trzy izotopy o liczbach masowych: 238 (99.27%), 235 (0.72%) i 234 (0.01%). Wszystkie wymienione izotopy są alfa-promieniotwórcze. Najdłużej żyjący jest uran ^{238}U ($T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$ lat), a najkrócej uran ^{234}U ($T_{1/2} = 2.5 \cdot 10^5$ lat). Uran-234 jest produktem rozpadów uranu-238 w szeregu promieniotwórczym uranowo-radowym. Znikoma część uranu ulega samorzutnemu rozszczepieniu na mniejsze fragmenty. Uran występuje w przyrodzie w skałach, glebach, rzekach i morzach. Występuje także w rudach w postaci tlenku U_3O_8 , jako tzw. smółka uranowa (blenda smolista). Najbardziej znane kopalnie tego minerału znajdują się w Czechach i w Kongu. Metaliczny uran otrzymuje się przez redukcję jego tlenku. Chociaż podobny z wyglądu do żelaza, uran jest znacznie cięższy. Jest dość odporny na działanie czynników atmosferycznych. Pierwiastek ten ma ogólne zastosowanie w energetyce jądrowej oraz przemyśle zbrojeniowym państw, które produkują broń jądrową. Dzięki dużej gęstości (większej od ołowiu) zubożonego uranu-238 (po oddzieleniu ^{235}U) coraz częściej wykonuje się pojemniki na izotopy, które do niedawna wykonywane były tylko z ołowiu. Ponadto stosuje się go obok ołowiu do wyrobu pocisków artyleryjskich. Koncentracja uranu jest uzależniona od podłoża i struktury geologicznej. W Polsce od 0.1 do 13g/t, średnia jest niska i wynosi 1.1g/t. Koncentracje powyżej 2g/t występuje w Sudetach, Karpatach i Górach Świętokrzyskich. Największe koncentracje uranu jakie znamy występują w Bloku Przedśudeckim.

Tor (^{90}Th) jest emitorem cząstek alfa o okresie półtrwania $T_{1/2} = 1.4 \cdot 10^{10}$ lat. W skorupie ziemskiej jest go prawie 10 razy więcej niż uranu. Jako mononuklid, tor ^{232}Th występuje głównie w piasku manacytowym. Jako krzemian ThSiO_4 - toryt wchodzi w skład niektórych rzadkich minerałów. Czysty metaliczny tor ma temperaturę topnienia 1827°C , a gęstość 11.7cm^{-3} . W związkach chemicznych występuje w stopniu utlenienia IV. Jest dość odporny na działanie kwasów i zasad. Tor znalazł zastosowanie jako składnik niektórych stopów. Jest stosowany w technice oświetleniowej. Tlenek toru dawniej był używany do wyrobu koszulek lamp gazowych. Obecnie związek ten ma pewne szanse zastosowania w energetyce jądrowej jako tanie paliwo jądrowe. Głównym izotopem występującym w minerałach skalnych jest ^{232}Th . Średnia koncentracja toru na powierzchni w Polsce wynosi 2.2g/t. Najwyższe koncentracje zanotowano w Karpatach i Sudetach. Koncentracje toru powyżej średniej zanotowano również na Wyżynie Lubelskiej, Roztoczu i południowej części Gór Świętokrzyskich.

Aktyn (^{89}Ac) Występuje w przyrodzie głównie jako produkt rozpadu uranu ^{235}U (szereg uranowo-aktynowy) w postaci alfa - i beta - promieniotwórczego radionuklidu ^{227}Ac o okresie półtrwania $T_{1/2} = 22$ lata (dla przemiany alfa). Jego stężenie jest niewielkie - w jednej tonie blendy smolistej znajduje się 0.12mg aktynu. Jego właściwości chemiczne i fizyczne są zbliżone do właściwości lantanu.

Polon (^{84}Po) należy do pierwiastków 16 grupy układu okresowego. Odkryty przez małżeństwo Curie polon-210 ma okres półtrwania 138 dni i jest emitерem alfa. W przyrodzie występuje w rudach uranu w szeregach promieniotwórczych jako produkt rozpadu promieniotwórczego. W jednej tonie rudy znajduje się 0.064mg polonu. Jest pierwiastkiem łatwo topliwym, ponadto jest łatwolatny, w związku z tym jest substancją niebezpieczną. Ma on podobne właściwości do selenu i teluru, znajdujących się w tej samej grupie, i tworzy związki, w których występuje na stopniach utlenienia II, IV i VI.

Rad (^{88}Ra) Poza odkrytym przez małżonków Curie radem ^{226}Ra występuje jeszcze trzy izotopy radu, wytwarzane w innych rodzinach promieniotwórczych. Ogółem otrzymano 21 izotopów radu. Rad jest emitерem promieniowania alfa, należy do drugiej grupy układu okresowego. Jest białym błyszczącym metalem o stosunkowo niskiej temperaturze topnienia. Podczas rozpadu promieniotwórczego wydziela się duża ilość ciepła (z jednego grama radu w ciągu godziny wydziela się 545 J). W jednej tonie rudy uranowej znajduje się około 0.34g radu w postaci związków chemicznych. Na skutek wymywania z rud jest on rozpowszechniony w skałach, glebie, wodach rzek i mórz oraz tkankach roślin i zwierząt. Rad ma swoje zastosowanie w medycynie (radioterapia), w defektoskopii (wykrywaniu wad w odlewach i spawach). Zmieszany z berylem stanowi źródło neutronów. Nuklid ^{226}Ra , członek szeregu uranowo-radowego, jest nuklidem o najdłuższym czasie życia ($T_{1/2} = 1620$ lat) spośród wszystkich znanych izotopów radu. Przemianie alfa towarzyszy tylko nieznaczna domieszka promieniowania gamma. Dlatego rad stosuje się jako źródło promieniowania gamma. Ostatnio rad jest coraz częściej zastępowany przez radionuklidy otrzymywane sztucznie.

3.3 Radon i jego pochodne

3.3.1 Właściwości fizyczne

Radon jest najcięższym gazem szlachetnym, bezbarwnym, bezwonnym i bez smaku. Dobrze rozpuszcza się w wodzie. Obecnie znanych jest 30 izotopów tego pierwiastka o liczbach masowych od 198 do 227, zawierających w jądrze 86 protonów i od 112 do 141 neutronów. Wszystkie izotopy radonu są promieniotwórcze, o różnych okresach półrozpadu: od mikrosekund do kilku dni. Większość z nich jest wytworzona sztucznie, a jedynie 3 występują naturalnie w przyrodzie. Są to izotopy ^{219}Rn , ^{220}Rn i ^{222}Rn . Powstają one z ciężkich pierwiastków zawartych w skałach, w wyniku następujących po sobie rozpadów typu alfa lub beta. Kolejne produkty tych przemian tworzą tzw. szereg promieniotwórczy. Szereg taki rozpoczyna się długożyciowym izotopem promieniotwórczym, a kończy izotopem trwałym. Znane są 4 szeregi, z czego 3 występują naturalnie w przyrodzie (patrz: poprzedni rozdział). Jest to jedyny gazowy pierwiastek promieniotwórczy. Wszystkie pozostałe są ciałami stałymi - ergo są uwięzione w skałach i nie mogą się przemieszczać. Radon natomiast może migrować ze skał i gleby ku powierzchni. Jest to najdłużej żyjący izotop, inne naturalne izotopy radonu mają dużo krótszy czas półrozpadu, który praktycznie uniemożliwia migrację w dużej ilości na powierzchnię ziemi, a tym bardziej przenikanie do wnętrza budynków. Jak wykazują dane, izotop ^{220}Rn stanowi 25% radonu w powietrzu atmosferycznym, a tylko 10% wewnątrz budynków. Resztę stanowi ^{222}Rn , gdyż ilość ^{219}Rn jest zanedbywalna. Występuje naturalnie, jako produkt rozpadu radu, który z kolei powstaje z obecnego w przyrodzie w sporych ilościach uranu. Jego najstabilniejszy izotop, ^{222}Rn , ma okres połowicznego rozpadu 3,8 dnia i jest stosowany w radioterapii. Radon w czasie rozpadu emituje promieniowanie alfa (oraz w mniejszym stopniu beta) o małej przenikliwości, ale o dużej zdolności jonizującej (wysoka energia, duża masa cząstki). ^{222}Rn jest izotopem naturalnym, pochodzącym bezpośrednio z rozpadu ^{226}Ra (o okresie połowicznego zaniku 1600 lat). Ten ostatni z kolei jest długożyciowym produktem przemian radioaktywnych zachodzących w naturalnym szeregu promieniotwórczym, którego pierwszym członem jest naturalny izotop uranu: ^{238}U . Zawartość uranu w skorupie ziemskiej wynosi średnio 2ppm (0,0002%), więc stosunkowo dużo. Dlatego też zawartość ^{222}Rn w powietrzu atmosferycznym w warstwie przy powierzchniowej jest znacząca. Średnie stężenie ^{222}Rn w powietrzu w Polsce wynosi ok. $10\text{Bq}/\text{m}^3$. Radon stanowi 40–50% dawki promieniowania, jaką otrzymuje mieszkaniec Polski od źródeł naturalnych. Radon może stanowić zagrożenie dla zdrowia człowieka, bowiem gromadzi się w budynkach mieszkalnych, zwłaszcza w piwnicach, przedostając się tam z gleby w wyniku różnicy ciśnień (efekt kominowy) (Rysunek 9). Dotyczy to zwłaszcza podłoża granitowego, zawierającego większe ilości uranu w swoim składzie niż np. skały osadowe. Aktualnie w Polsce obowiązuje limit stężenia radonu w nowych budynkach mieszkalnych wynoszący $300\text{Bq}/\text{m}^3$. Szkodliwość radonu jest wynikiem stosunkowo szybkiego jego rozpadu, prowadzącego do powstania kilku krótkożyciowych pochodnych, również radioaktywnych, emitujących promieniowania alfa. Ich zatrzymanie w płucach będzie powodować uszkodzenia radiacyjne, prowadzące do rozwoju choroby nowotworowej.

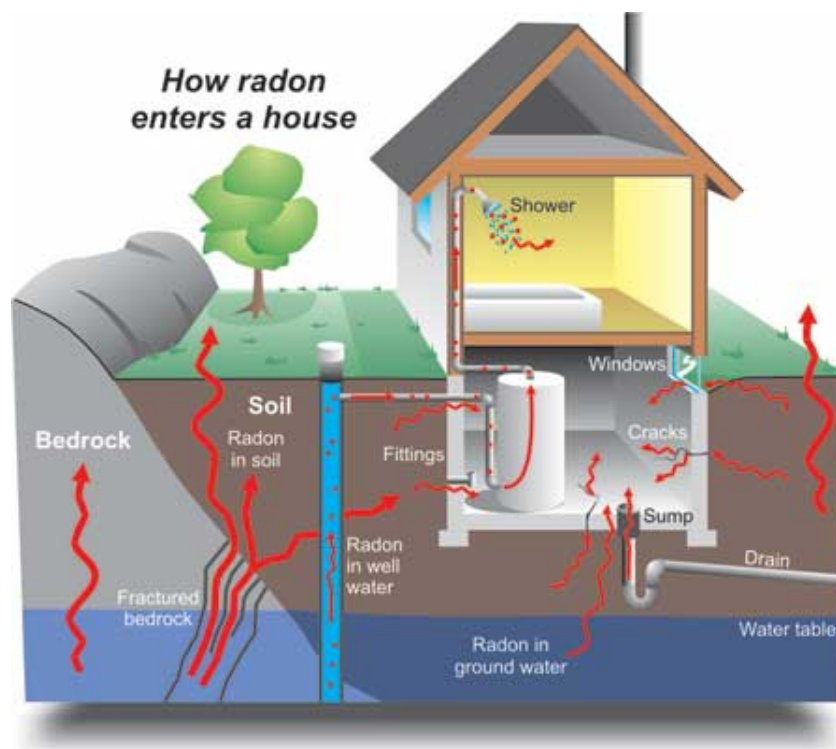
3.3.2 Jak radon dostaje się do domów?

Radon przedostaje się do wnętrza domów z podłoża i z materiałów budowlanych, a także z wody i gazu ziemnego używanych w codziennych czynnościach domowym, 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. 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 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 $740\text{Bq}/\text{kg}$, a w Niemczech nie przekracza od $20\text{Bq}/\text{kg}$. Różnice ciśnienia pomiędzy podłożem a wnętrzem domu powodują, że radon jest „wsysany” do wnętrza budynków z gleby. 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 [32].

Drogi przenikania radonu do wnętrza domu:

- 1) przez pęknięcia w ścianach
- 2) przez pęknięcia w podłodze
- 3) przez złącza w konstrukcji



Rysunek 9: Jak radon dostaje się do domów [21]

3.3.3 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 prysznica. 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.

3.3.4 Promieniowanie radonu na świeżym powietrzu

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 $2.7Bq/m^3$, ale w niektórych miejscowościach jest aż o rząd wielkości większa: na przykład w Kowarach ($30Bq/m^3$) czy w Świeradowie ($24Bq/m^3$). 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 $3.7Bq/m^3$ [32].

3.4 Radionuklidy zawarte w organizmie człowieka

Izotopy promieniotwórcze stanowią naturalny składnik organizmów żywych. Średnia aktywność radionuklidów w ciele człowieka wynosi 8000 Bq. W organizmie człowieka znajdują się (aktywności są podane dla człowieka o masie 70 kg [7]):

- potas ^{40}K (4000-6000 Bq)
- węgiel ^{14}C (ok. 3700 Bq)
- tryt 3H (70 Bq)
- polon ^{210}Po (40 Bq)
- rubid ^{87}Rb (600 Bq)
- radon ^{226}Ra (2 Bq)
- i inne

Jak widać, 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 oraz węgla ^{14}C w węglu, zawartość tych pierwiastków w organizmie człowieka ($\sim 18\%$ 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) otrzymujemy, 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. Średnia dawka skuteczna od izotopów promieniotwórczych w ciele człowieka wynosi 0,3 mSv rocznie (ok. 8% dawki całkowitej od źródeł naturalnych) [8].

3.5 Radionuklidy w produktach spożywczych

Radionuklidy naturalne znajdują się w produktach spożywczych i razem z nimi trafiają do organizmu człowieka. Rad włącza się do łańcucha pokarmowego człowieka. Z gleby przechodzi do roślin, a do organizmów zwierzęcych z pokarmem roślinnym, zawierającym zarówno rad inkorporowany w roślinach, a także rad osadzony na liściach i łodygach, oraz z wodą. Do organizmu człowieka rad dostaje się z artykułami żywnościowymi pochodzenia roślinnego, zwierzęcego i z wodą. Przechodzenie radu do organizmu człowieka drogą inhalacyjną jest zanedbywalnie małe w porównaniu z wnikaniem drogą pokarmową. Około 80% ^{226}Ra pobranego przez osoby dorosłe drogą pokarmową jest wydalane z kałem, a ok. 20% przechodzi do krwi, a następnie do tkanek. Rad kumuluje się przede wszystkim w kościach. W warunkach stałego i ciągłego pobierania ^{226}Ra z pożywieniem i wodą zawartość tego radionuklidu w ciele człowieka jest praktycznie niezmienna w ciągu całego życia. Średnia zawartość ^{226}Ra w kośćcu jest równa 25-dniowemu wchłonięciu tego radionuklidu drogą pokarmową, a w tkankach miękkich znajduje się około 17% radu obecnego w całym ciele [9].



Rysunek 10: Jeden banan dziennie to dawka większa niż od składowiska odpadów promieniotwórczych - Yucca Mountain [12]

Wprowadzona została tzw. dawka bananowa (BED - banana equivalent dose) jest to dawka promieniowania przyjęta przez osobę, spowodowana spożyciem jednego banana. Pomysł opiera się na tym, że banany są dobrym źródłem potasu, ważnego składnika żywieniowego. Potas naturalny zawiera 0.0117% potasu-40 (^{40}K), który jest izotopem radioaktywnym. Banan średniej wielkości zawiera około 451 mg potasu. Ilość ^{40}K zawarta w bananie wynosi 0.0528 mg. Średnia radioaktywność bananów to 3520 pCi ¹ na kg, albo w przybliżeniu 520 pCi na banan o wadze 150g. Dawka równoważna po zjedzeniu banana to około $0.1\mu\text{Sv}$. Banany są na tyle radioaktywne, by powodować regularne fałszywe alarmy przez pobudzenie czujników promieniowania wyczulonych na wykrywanie przemytu materiałów radioaktywnych na lotniskach i przejściach granicznych [11].

Badania 13 wód zlecone akredytowanym laboratoriom wykazały najwyższy poziom izotopu radu 226 w wodzie Staropolanka 2000 (0.616 bekereli na liter [Bq/l]), a zawartość uranu była największa w Ustroniance (1.02 $\mu\text{g/l}$), nieco mniej w Staropolance (0.6 $\mu\text{g/l}$) i Dobrawie (0.48 $\mu\text{g/l}$). Dla porównania - limit podawany przez WHO dla uranu wynosi (15 mikrogramów na liter [$\mu\text{g/l}$]).



Rysunek 11: W wodzie mineralnej też jest rad i uran [33]

¹1Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq, 1Bq = 1rozpad/s

Ilość cez i strontu w żywności szacuje się na 0.006 mSv. Produkty mające największy udział to: artykuły mleczne, mięsne, warzywne (głównie ziemniaki) i zbożowe (najwięcej Cs i Sr jest w produktach „leśnych”) [10]. Kartofle, fasola, orzechy i ziarno słonecznika również mają dość wysoki poziom promieniotwórczości. Najbardziej radioaktywnym naturalnym pożywieniem są orzechy brazylijskie, o poziomie aktywności około 6600 pCi/kg, a więc 1.875 razy większym niż radioaktywność bananów. Przykłady naturalnych źródeł promieniowania [13]:

Źródło	Aktywność promieniotwórcza
Banan	125 Bq/kg
Mleko	50 Bq/l
Woda mineralna	6 Bq/l
Woda morska	12 Bq/l

4 Promieniowanie naturalne wzmożone przez człowieka

4.1 Odpady kopalniane

Radionuklidy w produktach spalania węgla

Zarówno węgiel kamienny jak i węgiel brunatny zawierają znaczące ilości pierwiastków promieniotwórczych. Nie stwarzają one istotnego zagrożenia dla zdrowia człowieka, dużo gorsze są zanieczyszczenia chemiczne, ale gdy mówimy o odpadach z elektrowni jądrowych warto pamiętać, że odpady radioaktywne wydobywają się też z elektrowni węglowych i nie są wcale składowane pod kontrolą, przeciwnie, są rozpraszane po całej okolicy. Obecnie wiele wagi zwraca się na niebezpieczeństwa grożące człowiekowi. Niekontrolowany rozwój przemysłu spowodował znaczne zanieczyszczenie powietrza, wód, gleby, prowadząc do degradacji środowiska.



Rysunek 12: Składowisko odpadów kopalnianych, Borynia [24]

Intensywna działalność człowieka prowadzi do powstania takiej ilości promieniowania, która przekracza dopuszczalne średnie wartości. Dotyczy to zwłaszcza przemysłu wydobywczego. Eksploatowane na Górnym Śląsku kopalnie, wytwarzają m.in. odpady stałe oraz odprowadzają wody kopalniane, w których stężenia radionuklidów naturalnych mogą przekraczać te wartości nawet kilkaset razy. Tymczasem nieświadomi zagrożenia wykazujemy daleko posuniętą beztroskę, wykorzystując niektóre odpady i muł kopalniany jako opał do ogrzewania swoich domów. Nie wolno zapominać, że zwykły popiół też zawiera materiały promieniotwórcze: polski węgiel kamienny, podobnie jak węgiel kamienny z wielu innych krajów zawiera nieco uranu, ok. 2g w każdej tonie, co daje w popiołach 20g uranu na 1 tonę. Zużywając w naszym kraju rocznie ok. 85-90 mln ton węgla kamiennego, wyrzucamy na hałdy tony uranu, a jeżeli hałda fruwa w powietrzu, to uran jest stale obecny w zawieszynie zwanej aerozolem, której obłoki unoszą się nad Śląskiem i resztą Polski. Oprócz uranu w spalonym w Polsce węglu zawarte są duże ilości toru. W spalanych rocznie około 170 mln ton węgla kamiennego i brunatnego znajduje się około 500 ton uranu i toru łącznie, które są usuwane na wysypiska w popiołach lub wydmuchiwane do atmosfery w postaci pyłu. Ważnym zadaniem ochrony radiologicznej jest wykrywanie i kontrola zanieczyszczeń środowiska powodowanych radionuklidami naturalnymi. Zanieczyszczenia te są następstwem działalności energetyki, przemysłu i górnictwa. Materiały zgromadzone na składowiskach, hałdach i w stawach osadowych zawierać

mogą pierwiastki promieniotwórcze w stężeniach wielokrotnie większych od występujących w środowisku w jego naturalnym stanie. Dlatego też stosowanie żużli i popiołów lotnych jako surowców do produkcji materiałów budowlanych, bez ich właściwej kontroli i selekcji, prowadzić może do wzrostu dawki promieniowania jonizującego otrzymywanej przez ludność. Prowadzone w Polsce badania radioaktywności surowców i materiałów budowlanych oraz pomiary stężeń radonu w powietrzu budynków mieszkalnych mają na celu możliwie jak największe ograniczenie tego zagrożenia. Zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami, wszelka działalność powodująca lub mogąca powodować narażenie na promieniowanie podlega nadzorowi i kontroli. Dotyczy to jądrowych reaktorów badawczych i wszelkiego rodzaju zakładów stosujących źródła promieniowania jonizującego. Kontrolą objęte są takie działania, jak transport i składowanie źródeł promieniotwórczych, materiałów jądrowych i odpadów promieniotwórczych. Zadania służb ochrony radiologicznej w zakresie kontroli skażeń promieniotwórczych środowiska polegają na wykrywaniu tych skażeń i prowadzeniu systematycznych pomiarów radioaktywności: powietrza, opadu całkowitego, wód powierzchniowych i wodociągowych, ścieków, gleby, roślin, artykułów i produktów żywnościowych.

4.2 Materiały budowlane

Stopień zagrożenia radiacyjnego zależy od wielu czynników: wyboru materiałów budowlanych, rodzaju skał występujących w podłożu, lokalnej aktywności geologicznej oraz związanych z tym, świadomych bądź nieświadomych, decyzji ludzkich. Po drugie, w ocenie zagrożenia radiacyjnego nie ma znaczenia czy pochodzi ono ze źródła naturalnego, czy też ze skażeń sztucznych, ponieważ skutki biologiczne zależą od dawki łącznej otrzymanego promieniowania. W budownictwie istnieją przeróżne czynniki decydujące o narażeniu mieszkańców na promieniowanie jonizujące. Są nimi: miejsce posadowienia budynku, rodzaj konstrukcji oraz użyte materiały budowlane. Należałoby również rozważyć tutaj: wymianę powietrza w pomieszczeniu, ciśnienie atmosferyczne, a także rodzaj pokrycia ścian. Rozpatrując trzy podstawowe rodzaje promieniowania przez pryzmat budownictwa obserwuje się:

- promieniowanie alfa najmniej przenikliwe, może wnikać w organizm ludzki w wyniku wdychania radonu i toronu. Promieniowanie alfa jest w zasadzie nieszkodliwe, ze względu na swoją słabość przenikania, gdy pada na skórę człowieka. Niestety, może spowodować duże zagrożenie zdrowia, gdy działa wewnątrz organizmu. Na przykład, przy wdychaniu powietrza zawierającego radon ^{222}Rn i toron ^{220}Rn , drogi oddechowe zostają napromieniowane pochodnymi rozpadu tych pierwiastków, co może powodować nowotwory w organizmie.
- promieniowanie beta stanowią elektrony emitowane podczas rozpadu pierwiastków promieniotwórczych zawartych w materiałach budowlanych; ze względu na nieznaczną przenikliwość, promieniowanie to jest niemalże w całości pochłaniane przez same ściany i praktycznie nie stanowi źródła zagrożenia dla człowieka.
- promieniowanie gamma, promieniowanie elektromagnetyczne jest promieniowaniem bardzo przenikliwym, a przez to jego ograniczenie jest praktycznie niemożliwe. W budynkach źródłami promieniowania gamma mogą być: promieniotwórcze izotopy pierwiastków zawarte w materiałach budowlanych, grunt, na którym posadowiono budynek oraz część promieniowania kosmicznego przenikająca przez budynek. W związku z powyższym, konieczna jest kontrola pod względem zanieczyszczeń naturalnymi pierwiastkami promieniotwórczymi zarówno wyrobów budowlanych, jak i podłoża przeznaczonego pod zabudowę.

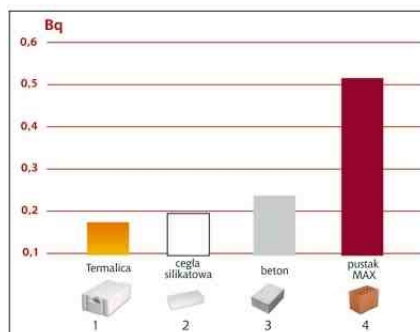
Zgodnie z wieloma aktami prawnymi (np. Prawo budowlane, Prawo atomowe) budynki przeznaczone na stały pobyt ludzi powinny spełniać warunki:

1. dawka graniczna dla osób narażonych na oddziaływanie promieniowania jonizującego z powodu stosowania wyrobów powszechnego użytku, emitujących promieniowanie nie powinna przekroczyć wartości 1mSv na całe ciało [26]
2. budynek z pomieszczeniami przeznaczonymi na pobyt ludzi i zwierząt nie może być wykonany z materiałów budowlanych nie spełniających wymagań w zakresie określonych dopuszczalnych zawartości naturalnych pierwiastków, promieniotwórczych [27]
3. średnie wartości roczne stężenia radonu ^{222}Rn w pomieszczeniach budynków przeznaczonych na stały pobyt ludzi nie mogą przekraczać: $200Bq/m^3$ w budynkach oddawanych do użytku po 1 stycznia 1998 roku oraz $400Bq/m^3$ w budynkach istniejących [26]

Zgodnie z obowiązującymi przepisami materiały budowlane stosowane do wznoszenia budynków powinny mieć ograniczoną zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych. Ich stężenie określane jest dwoma współczynnikami, które nie mogą być większe niż: $f_1 \leq 1.2$ oraz $f_2 \leq 240Bq/kg$ (zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z 3.12.2002). Wyroby budowlane dzieli się wg zawartości pierwiastków promieniotwórczych na trzy grupy:

- najmniej ma ich cegła silikatowa, beton komórkowy produkowany na bazie piasku
- średnią zawartość ma beton lekki z kruszywem keramzytowym
- podwyższoną zawartość ma cegła ceramiczna wypalana z gliny, żużlobeton i beton komórkowy produkowany przy użyciu popiołów lotnych

Materiał budowlany	$f_1 \leq 1.2$	$f_2 \leq 240Bq/kg$
Silikaty	0.16	20
Beton komórkowy piaskowy	0.16	20
Beton zwykły	0.22	24
Keramzytobeton	0.36	32
Ceramika	0.54	70
Żużlobeton	0.56	80
Beton komórkowy popiołowy	0.60	90



Rysunek 13: Promieniotwórczość f_1 materiałów ściennych [25]

Z Rys. 13 widać, że spośród najpopularniejszych materiałów do wznoszenia ścian, beton komórkowy posiada najniższe wskaźniki promieniowania.

4.3 Inne zastosowania

Utrwalone promieniotwórczo produkty żywnościowe mogą być napromieniowane w stabilnym promieniowaniu, co uniemożliwia wtórne skażenie. Dobrze dobrane opakowanie umożliwi napromieniowanie żywności w odpowiednich warunkach (atmosfera beztlenowa, niska temperatura, próżnia). W ten sposób można uniknąć strat w zawartości witamin, ale także zmian wartości smakowych (dotyczy to produktów ze znaczną zawartością tłuszczów). W procesie napromieniowania produktów żywnościowych wykorzystywane jest: promieniowanie X, gamma oraz przyspieszone elektrony. Przy dawce 1kGy można zatrzymać dojrzewanie oraz kiełkowanie w produktach roślinnych, unieszkodliwiać pasożyty, szkodniki. Przy dawce 10kGy można wyeliminować bakterie, mikroflorę patogenną, przez co zwiększa się trwałość produktów oraz zmniejsza ryzyko zatrucia pokarmowego.

Metody promieniotwórcze znalazły zastosowanie w przemyśle. Są wykorzystywane w procesie sterylizacji sprzętu wykorzystywanego w medycynie, w procesie barwienia tkanin, elektronice (elementy półprzewodnikowe), modyfikacji polimerów lub innych substancji, w procesie zabarwiania szkła oraz sztucznych i naturalnych kamieni. Liczba produktów, które są wytwarzane i modyfikowane promieniotwórczo wynosi rocznie około 1mln ton, i nieustannie wzrasta. Termokurczliwe taśmy oraz rurki (stosowane w izolacji elektrycznej) powstają w wyniku napromieniowania. Są wykorzystywane w procesie łączenia elementów.

Metody promieniotwórcze są wykorzystywane w procesie oczyszczania gazów wylotowych, powstające z różnych instalacji spalających. W wyniku tego procesu zmniejszan jest wydzielanie SO_2 oraz tlenków azotu o odpowiednio: 95% i 80%.

Metody radiacyjne są wykorzystywane także w sprzęcie promieniotwórczym (reaktory, mierniki, czujniki oraz regulatory).

Branża metalurgiczna oraz chemiczna wykorzystuje promieniotwórczość w grubościomierzach, gęstościomierzach, miernikach odczytujących poziom materiałów sypkich oraz ciekłych.

Inną metodą radiacyjną wykorzystywaną w przemyśle jest analiza radiacyjna (analiza jądrowa składu substancji). Stosując tę technikę można określić zanieczyszczenie ilościowe metalami ciężkimi w odpadach oraz azotu w nawozach sztucznych. Możliwa jest analiza jakościowa w tym samym czasie kilku pierwiastków. Poniżej przedstawiono wykorzystanie izotopów promieniotwórczych [35]:

Izotop promieniotwórczy	Czas połowicznego rozpadu	Rodzaj promieniowania	Zastosowanie
3H	12.3 lat	β	Błyszczące farby
^{238}Pu	87.7 lat	α	Stymulatory mięśnia sercowego
^{204}Tl	3.8 lat	β	Aparatura pomiaru grubości
^{241}Am	432 lata	α	Czujniki przeciwpożarowe
^{226}Ra	1600 lat	γ	Aplikatury radowe
^{60}Co	5.3 lat	γ	Radiografia, sprzęt radiacyjny, bomba kobaltowa, aparatura pomiarowa grubość, poziom cieczy, waga)
^{239}Pu	24000 lat	α	Czujniki przeciwpożarowe
^{131}I	8 dni	γ	Badanie tarczycy
^{182}Ir	73.8 lat	γ	Radiografia
^{137}Cs	30 lat	γ	Radiografia, pomiary grubości, bomba cezowa

5 Podsumowanie

Dawka skuteczna jaką otrzymuje mieszkaniec Polski w ciągu roku wynosi ok. 3.3 mSv, z czego 2.5 mSv to dawka pochodząca od narażenia naturalnego. Czynniki narażenia, będące wynikiem działalności prowadzonej przez człowieka, to radionuklidy stosowane w medycynie, radionuklidy będące pozostałością po awarii w Czarnobylu w 1986 roku i wybuchach jądrowych w latach 50-tych i 60-tych oraz inne działalności i przedmioty codziennego użytku. Roczna dawka graniczna, określona w przepisach dla osoby nienarażonej zawodowo, pochodząca od czynników innych niż naturalne, wynosi 1 mSv. Średnia dawka pochodząca od promieniowania naturalnego na powierzchni Ziemi wynosi 2.4 mSv [7]. Jej wartości mierzone w różnych miejscach, mogą jednak w znacznym stopniu odbiegać od tej średniej, jak pokazują poniższa tabela.

Dawki promieniowania od źródeł naturalnych [20]:

Źródła naturalne	Dawki mSv/rok
Średnia światowa	2.5
Polska	2.45
Grand Central Station New York	5.4
Norwegia	10.5
Ramsar, Iran	260.0
Guarapari, Brazylia (plaża)	790.0
Lodeve i Lauragais, Francja	870.0

Jak wykazały badania prof. Planeta [33] i innych naukowców, organizmy pozbawione promieniowania żyją krócej, nie rozmnażają się i ich ród ginie. Naturalne tło promieniowania i jego wahania w granicach dawek występujących na Ziemi nie szkodzą.

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.

Rysunek 14: Podsumowanie [32]

Literatura

- [1] Raport PAA, Warszawa 2011
- [2] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>
- [3] *Ilustrowana encyklopedia dla wszystkich Fizyka*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1985
- [4] Eric Chaisson, Steve McMillan *Astronomy Today*, Pearsons 2011, 7th Edition
- [5] <http://poznawaniebiblii.wordpress.com/>
- [6] *Encyklopedia fizyki współczesnej*, red nauk. Piotr Decowski, Warszawa PWN 1983
- [7] http://brain.fuw.edu.pl/edu/Fizyka:Promieniowanie_naturalne
- [8] http://www.fuw.edu.pl/~szef/Ochr%20Rad%20II/5_wewnetrzne.pdf
- [9] Mgr Lidia Rosiak *Badanie przechodzenia ^{226}Ra z gleby do roślin oraz ocena wchłonięć tego radionuklidu z pożywieniem*, Praca doktorska, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa 2003
- [10] http://www.fuw.edu.pl/~szef/OchrRad/1_zastosowanie%20promieniowania.pdf
- [11] F. William Walker et al. *Food Values of Portion Commonly Used*, 16th edition, Bosen and Church. Chart of Nuclide,
- [12] <http://zdrowieznatury.blox.pl>
- [13] <http://pl.wikipedia.org/> hasło: Promieniotwórczość naturalna
- [14] <http://szkola-ej.pl/iiszkola/referaty/odpady.pdf>
- [15] Danish National Space Center
- [16] http://www.iwiedza.net/materialy/astr_m040.html
- [17] <http://zmianyziemi.pl/>
- [18] Jolanta Naniewicz *Naturalne tło promieniowania i inne źródła - percepcja ryzyka*
- [19] http://szkola-ej.pl/referaty2013/p_krajewski.pdf
- [20] http://www.szkola-ej.pl/iiszkola/referaty/krajewski_pre.pdf
- [21] <http://www6.montgomerycountymd.gov/dectmpl.asp?url=/content/dep/air/radon.asp>
- [22] The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation *Sources and effects of ionizing radiation*, Unsear 2000 Report Vol. II.
- [23] <http://aga725.wordpress.com/rodzaje-promieniowania/>
- [24] http://www.poltegor.pl/zdjecia/z27_duzy.jpg
- [25] <http://ecoportal.com.pl>
- [26] Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dn. 31.03.1998 w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego i wskaźników pochodnych, określających zagrożenie promieniowaniem jonizującym (MP nr 14/1988) ze zmianami wprowadzonymi w 1995 r. (MP nr 35/1988)

- [27] Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dn. 22.03.1996r w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia, wydzielanych przez materiały budowlane, urządzenia i elementy wyposażenia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi (MP nr 19/1996, poz. 231)
- [28] http://podroze.gazeta.pl/podroze/56,114158,10680585,Aurora_borealis...Gdzie_mozna_zobaczyc_zorze_polarna...,2.html
- [29] <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=6226>
- [30] http://fizyka.net.pl/ciekawostki/ciekawostki_wn1.html
- [31] <http://www.aspera-eu.org/images/stories/Media/MEDIAPICTURES/HR/cosmicrays2.jpg>
- [32] Paweł Moskal, Sedigheh Jowzaee *Promieniowanie naturalne z Ziemi i z Kosmosu* Instytut Fizyki UJ, FOTON 117, Lato 2012
- [33] Planel, H., Bru, A., Soleilhavoup, J.P. and Tixador, R. (1967) *Effect of very low ionizing radiations on the multiplication of Paramecium aurelia*, C. R. Hebd.. Seances Acad. Sci. Ser. Sci. Natur., 264: 29452948
- [34] <http://kulturystyka.pl>
- [35] <http://rakteam.wordpress.com/>