

ENCYKLOPEDIA FIZYKI WSPÓŁCZESNEJ

PROMIENIOWANIE JĄDROWE W ŚRODOWISKU

Zbigniew Jaworowski

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, 03-194 Warszawa, ul. Konwaliowa 7

Promieniowaniem jądrowym są fale elektromagnetyczne i cząstki zdolne do jonizacji materii, tzn. mogące usuwać elektrony z atomów lub cząsteczek ośrodka przez który przenikają. Z tego powodu nazywane są one również promieniowaniem jonizującym. Należą tu cząstki jonizujące bezpośrednio, takie jak elektrony lub inne naładowane leptony, a także protony i inne hadrony, oraz promieniowanie jonizujące pośrednio, tj. fotony (promienie gamma i rentgenowskie), a także cząstki neutralne (neutrony, neutralne piony). Promieniowanie jonizujące emitowane jest podczas rozpadu jąder niestabilnych, lub po wzbudzeniu atomów i ich jąder w reaktorach jądrowych, cyklotronach, synchrotronach, aparatach rentgenowskich i innych urządzeniach. Z powodów historycznych, fotonową (elektromagnetyczną) część promieniowania emitowanego przez wzbudzone jądra nazywamy promieniami gamma, część emitowaną w procesach elektronowej de-ekscytacji promieniami rentgenowskimi, a emitowane z jądra elektrony promieniami beta, zaś jądra helu promieniami alfa.

Promieniowanie ultrafioletowe, którego część również jonizuje materię, nie jest tu omawiane. W dalszej części termin "promieniowanie" będzie zwykle używany zamiast "promieniowanie jonizujące" i "promieniowanie jądrowe". Podstawową wielkością używaną do określania wielkości ekspozycji na promieniowanie jest dawka pochłonięta. Jest to energia zaabsorbowana przez niewielką ilość materii podzieloną przez jej masę. Jednostką dawki pochłoniętej jest grej (Gy), odpowiadający energii jednego dżula na kilogram. Skutki biologiczne powstające po ekspozycji na jednostkę dawki pochłoniętej zmieniają się w zależności od typu promieniowania i napromienionej części ciała. Różnice te uwzględnia wielkość ważona zwana dawką efektywną, której jednostką jest siwert (Sv). Źródło promieniowania emitowanego podczas rozpadu jąder określane jest jego aktywnością, która jest liczbą rozpadów jąder na jednostkę czasu. Jednostką aktywności jest bekerel (Bq). Jeden bekerel jest jednym rozpadem na sekundę. Poprzednią, obecnie nieformalną, jednostką aktywności był kiur (Ci) wynoszący $3,7 \times 10^{10}$ rozpadów na sekundę.

Przenikliwe i niewidzialne promieniowanie jądrowe wykrył pod koniec roku 1895 Wilhelm C. Röntgen i nazwał je promieniami X. Wyniki eksperymentów Röntgena zostały przedstawione w Paryżu przez Henri Poincaré 20 stycznia 1896 w obecności Henri Becquerela. Poincaré zasugerował, że powstawanie tych promieni może być wynikiem zjawiska luminescencji, a Becquerel, dla zbadania czy substancje w których zachodzi luminescencja emitują promienie X, posłużył się związkami uranu. W dniu 24 lutego 1896 ogłosił, że sole uranu emitują

promieniowanie fluorescencyjne, o przenikliwości podobnej do promieni X, a w dniu 1 marca stwierdził, że promieniowanie to jest fosforescencją. Dzień ten przyjmowany jest jako data odkrycia radioaktywności. Rzeczywistą naturę promieniowania jądrowego wyjaśniono kilka lat później. W ciągu następujących dwóch lat Becquerel wykazał, że wszystkie związki uranu i uran metaliczny emitują promieniowanie i porzucił ideę fosforescencji.

Odkrycie promieni rentgenowskich wzbudziło niezwykle zainteresowanie świata nauki. W ciągu roku 1896 opublikowano ponad 1000 prac na jego temat. Natomiast uranowe promienie Becquerela początkowo nie wzbudziły entuzjazmu. Sytuacja zmieniła się gdy promieniami tymi zajęła się Maria Skłodowska-Curie w swej pierwszej samodzielnej pracy opublikowanej w r. 1898 (*Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium. Note de Mme Skłodowska Curie, présentée par. M. Lippman, Comptes Rendis de la Academie de Sciences, Paris, 126: 1101-1103*). W pracy tej przebadła bardzo wiele substancji innych niż uran i jego związki. Trzy z tych substancji zawierały radioaktywny potas-40, ale promieniowały tak słabo, że nie zwróciła na nie uwagi. Z jej pomiarów wynikało, że promieniowanie jądrowe nie jest zjawiskiem molekularnym lecz jądrowym, oraz że blenda uranowa (UO_2) jest niemal 3,5-krotnie bardziej aktywna niż metaliczny uran, a naturalny minerał uranu chalkolit ($(\text{Cu}(\text{UO}_2)_2\text{PO}_4)_2 \cdot 6-8 \text{H}_2\text{O}$) 2,5-krotnie. Uznała, że wskazuje to na możliwość występowania w minerałach uranu pierwiastka znacznie bardziej aktywnego niż sam uran. Te spostrzeżenia stały się podstawą odkrycia w tym samym roku polonu, wspólnie z mężem Piotrem Curie, oraz radu, wspólnie z P. Curie i G. Bemontem. Ogłaszając odkrycie polonu autorzy po raz pierwszy użyli określenia "radioaktywny". Odkrycie tych dwóch pierwiastków radioaktywnych spowodowało gwałtowny wzrost badań nad radioaktywnością i promieniowaniem. Maria Skłodowska-Curie w swej pierwszej pracy, zasugerowała błędną interpretację natury promieniowania jądrowego. Słusznie stwierdziła, że cała przestrzeń jest stale wypełniona promieniami analogicznymi do promieni Röntgena, ale znacznie bardziej przenikliwymi. Jednocześnie jednak uznała, że promienie te są absorbowane jedynie przez pierwiastki o wysokim ciężarze atomowym, takie jak uran i tor, z których następnie (jak z "kondensatorów") są emitowane. W r. 1901 Becquerel zasugerował, że radioaktywne atomy ulegają rozpadowi. Jeszcze w r. 1902 małżonkowie Curie wypowiedzieli się za stabilnością radioaktywnych atomów, których aktywność miałyby nie zmieniać się w czasie emitowania energii zaabsorbowanej z zewnątrz. Wyjaśnienie zjawiska radioaktywności i natury promieniowania jądrowego rozstrzygnięte zostało na podstawie badań toru i jego pochodnych przez Ernesta Rutherforda i Fredericka Soddy'ego, w dwóch pracach opublikowanych we wrześniu i listopadzie 1902.

W dwudziestym wieku status społeczny promieniowania jądrowego oscylował pomiędzy entuzjastyczną akceptacją i odrzuceniem. Zmiany te biegły równoległe z poznawaniem trzech podstawowych cech promieniowania: jego przydatnością do celów medycznych,

technicznych i do badań naukowych, dobroczynnymi skutkami małych dawek promieniowania, oraz szkodliwymi efektami jego wysokich poziomów. W pierwszej połowie XX-ego wieku akceptacja przeważała, a w połowie drugiej odrzucenie. Zmiana społecznego nastroju, która nastąpiła po II Wojnie Światowej, nie wynikała z odkrycia nowych niebezpiecznych własności promieniowania, lecz wywołana została politycznymi i społecznymi czynnikami, nie związanymi z promieniowaniem. Najważniejszymi z nich było widmo wojny jądrowej będące podstawową przyczyną negatywnego nastawienia do nauki i techniki, sprzeciw wobec szaleńczego wyścigu zbrojeń jądrowych, oraz arbitralne przyjęcie w ochronie radiologicznej nie udowodnionego naukowo założenia o liniowym, bez-progowym wpływie promieniowania na skutki biologiczne, zwanym założeniem LNT (od ang.: linear, no-threshold). Z tego założenia wyciągnięto wniosek, że nawet najmniejsze, bliskie zera dawki promieniowania przynoszą efekt szkodliwy. Stało się ono przyczyną powszechnej radiofobii, irracjonalnego lęku przed promieniowaniem i wszystkimi sprawami jądrowymi. Już w r. 1898 stwierdzono dobroczynne działanie małych dawek promieniowania na organizmy żywe, a w ciągu dwudziestego wieku opublikowano około 2000 prac wskazujących na stymulujące i adaptacyjne działanie małych dawek. W r. 1994 Komitet Naukowy Narodów Zjednoczonych do Spraw Promieniowania Atomowego (UNSCEAR) potwierdził istnienie tego zjawiska, zwanego hormezą radiacyjną i będącego w sprzeczności z założeniem LNT.

Jednym z głównych czynników wzbudzających lęk społeczeństwa przed promieniowaniem były próbnе wybuchy jądrowe, w wyniku których wprowadzono do atmosfery wiele radionuklidów, które następnie przedostały się do wszystkich komponentów środowiska, a także do organizmu ludzi (Rysunek 1). Sumaryczna aktywność dziewiętnastu z tych radionuklidów najważniejszych z punktu widzenia narażenia ludności, wprowadzonych do atmosfery w latach 1945 - 1980, wynosiła $1,7 \times 10^{21}$ Bq, w tym około 3 tony plutonu. Wybuchy w Hiroszynie i Nagasaki w r. 1945 wprowadziły do północnej troposfery około 2×10^{17} Bq, z czego około 20% przypadło na lokalny i regionalny opad radioaktywny. W czasie wypadku w Czarnobylu łączna aktywność 25 najważniejszych radionuklidów uwolnionych do atmosfery w r. 1986 wyniosła około 8×10^{18} Bq.

W latach pięćdziesiątych, na podstawie wyników eksperymentów radiogenetycznych, prowadzonych głównie na muszce owocowej, obawiano się, że radionuklidy z próbnych wybuchów jądrowych mogą mieć szkodliwy wpływ genetyczny na populację współczesną i wiele następnych. Obawy te okazały się niesłuszne. Średnia dawka promieniowania otrzymana przez ludność świata w okresie największego światowego opadu promieniotwórczego w r. 1963, wyniosła zaledwie 0.113 mSv, czyli około 5% średniej globalnej rocznej dawki naturalnej (2,4 mSv), a w r. 2000 0,0055 mSv. Po tak znikomych dawkach nie należało oczekiwać zauważalnych zmian genetycznych. Okazało się również, że

u potomstwa ofiar ataku atomowego na Hiroszimę i Nagasaki, nawet tych które otrzymały dawki bliskie śmiertelnych, nie wystąpiły żadne zaburzenia genetyczne, a także, że długość życia tych ofiar jest dłuższa niż nie napromienionej ludności Japonii. Zjawisko hormezy radiacyjnej (mniejszą zapadalność na nowotwory i inne schorzenia) wykryto w grupach kilkudziesięciu tysięcy osób zawodowo narażonych na małe dawki promieniowania (pracownicy zakładów jądrowych, lekarze radiolodzy), wśród pacjentów poddanych wielokrotnym rentgenowskim zabiegom diagnostycznym, wśród ludności terenów skażonych po wypadku w zakładach produkcji broni jądrowej MAJAK na Uralu, oraz wśród mieszkańców terenów o wysokim naturalnym poziomie promieniowania.

Promieniowanie jądrowe od niepamiętnych czasów przenika całą przestrzeń Wszechświata i Ziemi oraz wszystkie istoty żyjące. Gdy na Ziemi życie powstawało około 3,5 miliarda lat temu, naturalne tło promieniowania jonizującego na powierzchni planety było trzy do pięciu razy wyższe niż obecnie. W owym czasie długo-żyjący potas-40 ($T_{1/2} = 1.28 \times 10^9$ lat), uran-238 ($T_{1/2} = 4,47 \times 10^9$ lat) i tor-232 ($T_{1/2} = 1.405 \times 10^{10}$ lat) nie zdążyły jeszcze rozpaść się do ich dzisiejszego poziomu w środowisku. Zawartość tych trzech nuklidów i ich pochodnych w biosferze Ziemi jest obecnie ciągle jeszcze wysoka i są one odpowiedzialne za największą część średniej globalnej naturalnej dawki promieniowania otrzymywanej przez człowieka (84,6%), od zewnętrznego promieniowania gamma oraz napromienienia wewnętrznego. Na radon-222 przypada 48% tej dawki. Prócz tego promieniowanie jonizujące pochodzi od czterech innych długo-żyjących radionuklidów ($T_{1/2} =$ od $3,73 \times 10^{10}$ lat do $1,06 \times 10^{11}$ lat) występujących w śladowych ilościach w skorupie ziemskiej. Są to rubid-87, lantan-138, samar-147 i lutet-176. Drugim z kolei źródłem naturalnej dawki promieniowania (ok. 15%) są galaktyczne i słoneczne promienie kosmiczne, które wchodząc w interakcję ze składnikami atmosfery wytwarzają kaskadę wtórnych reakcji jądrowych oraz czternaście radionuklidów zwanych kosmogenicznymi. Z pośród nich najwyższe stężenie w troposferze osiągają węgiel-14 ($56,3 \text{ mBq/m}^3$), beryl-7 ($12,5 \text{ mBq/m}^3$) oraz argon-39 ($6,5 \text{ mBq/m}^3$). Wszystkie radionuklidy kosmogeniczne dają łączną dawkę sięgającą zaledwie 0.4% średniej globalnej naturalnej dawki promieniowania. Dawka od większości składników promieniowania kosmicznego, zwiększa się wraz z wysokością nad poziomem morza (od $0.03 \mu\text{Sv/godzinę}$ na poziomie morza do $13 \mu\text{Sv/godzinę}$ na wysokości 20 km) a także z szerokością geograficzną (Rysunek 2).

Radioaktywny potas-40 znajduje się we wszystkich żywych komórkach. Każda komórka zawiera około 5 milionów atomów potasu-40, które w 1 gramie tkanki miękkiej rozpadają się z szybkością około 5 rozpadów na minutę, dając od napromienienia wewnętrznego dawkę $0,17 \text{ mSv}$ rocznie. Od nuklidów rodziny uranowej i torowej znajdujących się w organizmie przeciętny człowiek otrzymuje dawkę $0,12 \text{ mSv}$ rocznie. W ciągu jednego dnia w komórkach przeciętnego dorosłego człowieka rozpada się około 400 milionów atomów naturalnych

radionuklidów (nie licząc radonu-222). W wyniku tych rozpadów oraz cząstek naturalnego promieniowania docierających do naszych organizmów z zewnątrz, czyli w wyniku średniej rocznej dawki promieniowania naturalnego (2,4 mSv), w ciągu jednego roku powstaje w każdej komórce około 5 uszkodzeń DNA. W tym samym czasie, wskutek termodynamicznego rozpadu molekuł, a przede wszystkim normalnego działania agresywnych rodników powstających w czasie metabolizmu tlenu, w każdej komórce powstaje około 70 milionów różnego typu spontanicznych uszkodzeń DNA. Wśród tych naturalnych uszkodzeń najgroźniejsze są uszkodzenia podwójnej nici DNA, ponieważ szansa ich naprawy jest tysiące razy mniejsza niż uszkodzeń nici pojedynczej i w efekcie łatwiej mogą doprowadzić do powstania nowotworu lub zmiany genetycznej. Około 40 spontanicznych uszkodzeń podwójnej nici DNA powstaje w ciągu roku w każdej komórce, natomiast po dawce promieniowania 1 mSv (zalecanej jako roczny limit dawki) powstaje 0.04 takich uszkodzeń, tj. 1000 razy mniej. Średnia naturalna dawka promieniowania wywołuje około 0,1 uszkodzenia podwójnej nici DNA rocznie.

Głównym źródłem radionuklidów szeregu uranowego i torowego w biosferze jest skorupa ziemska, z której procesy naturalne i ingerencja człowieka przenoszą je do gleby oraz do środowiska wodnego i do atmosfery. Procesy te prowadzą zarówno do rozpraszania tych radionuklidów na poziomie lokalnym i globalnym jak i do ich wzbogacania w poszczególnych składnikach biosfery. Na poziomie lokalnym, w różnych komponentach środowiska pochodne uranu i toru rzadko znajdują się w stanie równowagi radioaktywnej ze swymi pierwiastkami macierzystymi, ze względu na różnice chemiczne, fizyczne i biologiczne, natomiast osiągają stan równowagi na poziomie globalnym.

Innym źródłem radionuklidów z rodziny uranowej i torowej oraz potasu-40 w biosferze jest materia pozaziemska opadająca na powierzchnię globu. Skorupa Ziemi ma wyższą średnią koncentrację uranu (2.7 ppm), toru (9.6 ppm) i potasu (1,36%) niż materiał chondrytyczny nadlatujący do nas z kosmosu (odpowiednio: 0.014 ppm, 0.040 ppm i 0.085%). W przypadku uranu i toru spowodowane to zostało geochemicznym frakcjonowaniem Ziemi, które doprowadziło do silnie wzrastających ku górze stężeń U^{4+} i Th^{4+} , pierwiastków nie mogących wejść w szósty stopień utlenienia w gęsto upakowanych strukturach wnętrza Ziemi. W wyniku tego procesu niemal cały uran i tor są skoncentrowane w warstwie powyżej 400 km głębokości. Geochemiczne różnice pomiędzy macierzystym uranem i torem a ich nuklidami pochodnymi często prowadzą do drastycznych zmian ich równowagi radioaktywnej w poszczególnych komponentach środowiska. Z tego powodu zawartość w atmosferze Ziemi dwóch radionuklidów z szeregu uranowego: radu-226 ($3,5 \times 10^{15}$ Bq) oraz ołowiu-210 ($1,3 \times 10^{15}$ Bq), różnią się kilkadziesiąt razy od zawartości ich macierzystego uranu-238 (9×10^{13} Bq). Klasycznym przykładem tych różnic jest gazowy radon-222, którego roczny strumień do

atmosfery Ziemi wynosi około 3×10^{19} Bq, a strumień jego bezpośredniego pierwiastka macierzystego, radu-226, jest kilkadziesiąt milionów razy mniejszy (4×10^{11} Bq/rok).

Aktywność naturalnych radionuklidów we wnętrzu Ziemi oraz zawartych w jej skorupie jest ogromna. Jest ona odpowiedzialna za utrzymywanie wnętrza Ziemi w stanie płynnym, a w warstwie gleby i skał o grubości 1 km wytwarza 8000 kalorii na m^2 rocznie. W porównaniu z nią aktywność odpadów radioaktywnych z energetyki jądrowej jest znikoma (Tablica 1). W jednym kilometrze sześciennym gleby zawartość radionuklidów naturalnych jest wyższa niż aktywność radioaktywnych odpadów ze wszystkich reaktorów energetycznych w r. 1997. Aktywność odpadów zakumulowanych do r. 2000 z całego cyklu paliwowego światowej energetyki jądrowej, po 500 latach chłodzenia, będzie podobna do aktywności naturalnych radionuklidów zawartych w bloku gleby głębokim na 1 km o przekroju poziomym wynoszącym $1,7 \text{ km}^2$. Aktywność ta stanowić będzie około jednej miliardowej części naturalnej aktywności zawartej w skorupie Ziemi. W przeciwieństwie do odpadów z przemysłu jądrowego, naturalne radionuklidy nie są zabezpieczone przed migracją do powierzchni gruntu (np. z głębokości 1 km) specjalnym zwielokrotnionym systemem trwałych barier. Są one swobodnie przenoszone w środowisku w postaci roztworów, lub przez czynniki mechaniczne. Np. uran może migrować w wodach gruntowych na odległość dziesiątków i setek kilometrów. Rad-226 (pochodna uranu-238) jest również bardzo mobilny w kwaśnym lub obojętnym środowisku, przy braku siarki w wodach gruntowych. Przykładem takiej sytuacji jest miejscowość uzdrowska Ramsar w Iranie, gdzie rad-226 wynoszony wodami gruntowymi z głębokich warstw ku powierzchni jest odpowiedzialny za niezwykle wysoką dawkę naturalnego promieniowania w niektórych domach ($>700 \text{ mSv/rok}$), przekraczającą setki razy średnią globalną dawkę naturalną ($2,4 \text{ mSv/rok}$). Wśród mieszkańców Ramsar, oraz w innych miejscowościach o wysokim tle naturalnego promieniowania (m.in. w Brazylii, Chinach, Francji, Indiach, USA) nie wykryto zwiększonej częstości zachorowań na nowotwory złośliwe, ani zaburzeń genetycznych. Wysokie stężenia radu-226 występują również w wodach dołowych odprowadzanych z niektórych kopalń węgla kamiennego w Polsce (do 270 Bq/l). Aktywność osadu wytrącającego się z tych wód na powierzchni sięga do 1000 Bq/g , a całkowita aktywność radu-226 odprowadzana do środowiska z tymi wodami z polskich kopalń sięga około $3,7 \times 10^{11} \text{ Bq/rok}$. Podobna sytuacja występuje w niemieckim zagłębiu węglowym w Północnej Westfalii. W skali globu, spalanie węgla rozprasza rocznie w atmosferze $8,5 \times 10^{12} \text{ Bq}$ radu-226. Jest to sto razy mniej niż aktywność radonu-222 uwalniana z kopalni węgla i kilka milionów razy mniej niż naturalny roczny strumień radonu-222 do atmosfery (Tablica 2).

Zawartość radionuklidów w wodach oceanów jest 3 do 5 rzędów wielkości mniejsza niż w skorupie Ziemi (Tablica 1). Stężenie potasu-40 w wodzie morskiej wynosi 11 Bq/L , uranu-238 40 Bq/L , a toru $0,004 \text{ Bq/L}$.

Emisje wulkaniczne do atmosfery globu naturalnego polonu-210 (silnie toksyczny emiter cząstek α), wynoszą w okresach bez-wybuchowych około 5×10^{15} Bq/rok (Tablica 2), czyli blisko dwukrotnie więcej niż w r. 1997 wynosiła cała produkcja odpadów radioaktywnych w jądrowych reaktorach energetycznych.

TABLICA 1. Zawartość w skorupie Ziemi potasu-40, uranu-238 i toru-232 i ich nuklidów pochodnych, oraz aktywność radioaktywnych odpadów z energetyki jądrowej, i najważniejszych radionuklidów z wybuchów jądrowych (Bq); w nawiasach czas połowicznego zaniku ($T_{1/2}$) pierwiastków macierzystych, w latach .

	^{40}K	^{232}Th	^{238}U	Łącznie
Średnie stężenie pierwiastka macierzystego w 1 g gleby	0,420 ($1,28 \times 10^9$)	0,045 ($1,40 \times 10^{10}$)	0,033 ($4,47 \times 10^9$)	0,498
Liczba radionuklidów w łańcuchu	1	9	14	24
Zawartość w skorupie ziemskiej	$7,3 \times 10^{24}$	$7,8 \times 10^{23}$	$5,7 \times 10^{23}$	$8,6 \times 10^{24}$
Zawartość w wodzie oceanów	$1,6 \times 10^{22}$	$3,5 \times 10^{19}$	$7,9 \times 10^{20}$	$1,7 \times 10^{22}$
Zawartość w 1 km^3 gleby	$8,4 \times 10^{14}$	$8,1 \times 10^{14}$	$9,2 \times 10^{14}$	$2,6 \times 10^{15}$
Odpady ze wszystkich energetycznych reaktorów jądrowych w r. 1997 ^a	$2,2 \times 10^{15}$			
Odpady skumulowane do r. 2000 z całego cywilnego nuklearnego cyklu paliwowego po 500 latach chłodzenia ^a	$7,4 \times 10^{15}$			
Wybuchy jądrowe: 16 głównych radionuklidów (o krótkich okresach zaniku, $T_{1/2}$, od 8,02 dni do 30,7 lat, rozproszonych w atmosferze, oraz długo-żyjący Pu-239 ($T_{1/2}=24.110$ lat)	$1,7 \times 10^{21}$ 6×10^{15} ^a Bez odpadów gazowych.			

Poza napromienieniem ze źródeł medycznych, największą antropogeniczną dawkę promieniowania otrzymujemy od radionuklidów dostających się do środowiska przez rozpraszanie w atmosferze. Dlatego porównanie strumieni energii jonizującej do atmosfery jest dobrą podstawą oceny zagrożenia radiacyjnego różnych źródeł promieniowania.

W Tabelicy 2 podano największe roczne strumienie do atmosfery radionuklidów pochodzących ze źródeł naturalnych oraz wytworzonych przez człowieka. Przy rozpadzie poszczególnych nuklidów uwalniana jest do środowiska różna energia promieniowania. Dlatego wpływ tych nuklidów na środowisko lepiej oddaje energia wyrażona w dżulach (J) niż sama liczba rozpadów, czyli aktywność wyrażona w bekerelach (Bq). W Tabelicy 2 podano obie te wartości, których kolejność jest często różna dla poszczególnych radionuklidów.

Ja wynika z Tabelicy 2, największa ilość energii jonizującej oddawana jest do atmosfery w wyniku naturalnej emisji radonu-222. Wszystkie inne źródła promieniowania jądrowego są o kilka rzędów wielkości mniejsze. Radon-222 dominuje również w przypadku energetyki jądrowej i węglowej (w obu przypadkach jego źródłem jest kopalnictwo); stanowi on jednak

Tablica 2. Kolejne najważniejsze roczne strumienie radionuklidów do środowiska ze źródeł naturalnych i sztucznych, uszeregowane wedle aktywności i uwolnionej energii.

Źródła	Aktywność (Bq)		Energia (J)	
Naturalne emisje gazów i pyłów z powierzchni lądów i mórz oraz materia pozaziemska (do atmosfery)	Rn-222	$3,3 \times 10^{19}$	Rn-222	$3,0 \times 10^7$
	H-3	$7,4 \times 10^{16}$	Pb-210	$1,9 \times 10^4$
	Pb-210	$1,8 \times 10^{16}$	Ra-226	$1,1 \times 10^3$
	C-14	$1,4 \times 10^{15}$	H-3	2×10^2
	Ra-226	$2,4 \times 10^{14}$	U-238	$1,6 \times 10^2$
	U-238	$1,48 \times 10^{14}$	C-14	$3,5 \times 10^1$
Broń jądrowa: wybuchy i produkcja (do atmosfery) ^a	H-3	$7,0 \times 10^{18}$	H-3	$2,1 \times 10^4$
	Cs-137	$2,6 \times 10^{16}$	Cs-137	$2,3 \times 10^3$
	C-14	$6,3 \times 10^{15}$	Rn-222	$1,5 \times 10^3$
	Rn-222	$4,1 \times 10^{14}$	Pu-239	3
Wypadek w Czarnobylu (do atmosfery) ^b	Cs-137	$7,0 \times 10^{16}$	Cs-137	$6,1 \times 10^3$
Energetyka jądrowa (do atmosfery) ^c	H-3	$5,6 \times 10^{16}$	Rn-222	$1,3 \times 10^4$
Emisje wulkaniczne w okresach bez-wybuchowych (do atmosfery)	Po-210	$5,1 \times 10^{15}$	Po-210	$4,4 \times 10^3$
Spalanie węgla (do atmosfery) ^d	Rn-222	$8,5 \times 10^{14}$	Rn-222	$7,6 \times 10^2$

Nawozy sztuczne (do gleby uprawnej)	Ra-226	$4,1 \times 10^{13}$	Ra-226	$3,2 \times 10^1$ ^a Średnio rocznie w latach 1945- 1980; ^b emisja w ciągu 10 dni w 1986; ^c średnio w 1981; ^d średnio dla 1980.
-------------------------------------	--------	----------------------	--------	---

znikomą część naturalnej emisji radonu (odpowiednio: 0.04% i 0,0025%). Największą dawkę promieniowania od radonu-222 otrzymuje ludność w budynkach, gdzie stężenie radonu w powietrzu jest zwykle kilkakrotnie wyższe niż na zewnątrz. Typowe stężenie radonu-222 na zewnątrz budynków wynosi około 10 Bq/m^3 (zakres od 1 do $100 >\text{Bq/m}^3$), natomiast wewnątrz budynków wynosi ono średnio około 40 Bq/m^3 . Stężenia radonu-222 w budynkach wahają się od 9 Bq/m^3 w Egipcie do $85\,000 \text{ Bq/m}^3$ w Szwecji. W Polsce średnie stężenie radonu-222 wynosi około 40 Bq/m^3 a maksymalne 3261 Bq/m^3 .

Radionuklidy naturalne i sztuczne nie są równomiernie rozproszone w atmosferze. Pionowy rozkład stężeń radionuklidów wprowadzonych do stratosfery, (np. cezu-137 z wybuchów jądrowych, lub berylu-7 wytwarzanego w stratosferze przez promieniowanie kosmiczne) jest inny niż radionuklidów, których źródłem jest powierzchnia Ziemi (np. rad-226) (Rysunek 3). Najwyższe stężenia cezu-137 i berylu-7 występują w stratosferze, zmniejszając się najpierw powoli w miarę zniżania się ku jej granicy z troposferą (tropopauzą), a następnie gwałtownie w samej troposferze, osiągając najniższe wartości przy powierzchni Ziemi. Natomiast stężenie radu-226 jest wysokie przy powierzchni Ziemi, maleje w stronę tropopauzy i ponownie wzrasta w stratosferze do wysokości 15 km, niekiedy do wartości wyższych niż przy powierzchni Ziemi. Takie zachowanie się radionuklidów mających źródło przy powierzchni Ziemi wskazuje na "pułapkowe" działanie stratosfery, która również spełnia rolę magazynu radionuklidów i innych pyłów wprowadzonych do niej przez wybuchy jądrowe i wulkaniczne, a także (jak to ma miejsce po wypadku w Czarnobylu) wzniesionych tam wstępującymi prądami powietrza. W stratosferze radionuklidy krążą w kierunku wschodnim, okrążając Ziemię w ciągu około dwóch tygodni. Na tych wysokościach zachodzi również

wymiana pyłów pomiędzy obu półkulami. W troposferze wymiana taka nie zachodzi ze względu na charakter globalnego transportu mas powietrznych. Po ostatnim powietrznym chińskim wybuchu nuklearnym o mocy 0.6 Mt, przeprowadzonym na poligonie Lob Nor w północno-zachodnich Chinach w dniu 16 października 1980, chmura radioaktywnego pyłu dotarła w stratosferze nad Polskę na wysokości 15 km i 12 km w dziewiątym dniu po wybuchu, w troposferze po dwóch miesiącach, a w powietrzu przyziemnym po czterech miesiącach.

Wysokie stężenia radionuklidów a także pyłów nie radioaktywnych występujące, jako tzw. warstwa Jungego, w dolnej stratosferze (nad Polską do wysokości około 17 km), powodowane są brakiem intensywnych procesów meteorologicznych w tej części atmosfery. Z tego powodu średni czas przebywania radioaktywnych pyłów w stratosferze jest stosunkowo długi (około 1 roku). Do troposfery pyły ze stratosferycznego magazynu przedostają się do troposfery głównie przez przerwy w tropopauzie, występujące w pobliżu stratosferycznych prądów strumieniowych. Największe przenikanie pyłów do troposfery występuje w okresie wiosennym. W troposferze średni czas przebywania pyłów wynosi tylko około 1 miesiąca, ponieważ są one szybko usuwane przez deszcze, śnieg i pionowe prądy powietrzne. Zmiany stężeń promieniotwórczego cezu w powietrzu stratosfery i przy powierzchni Ziemi w Polsce przedstawione są na Rysunku 4. Wypadek w Czarnobylu na krótki czas podniósł zawartość radionuklidów w powietrzu nad Polską. Natomiast jego wpływ na depozycję cezu-137 był w skali Półkuli Północnej niezauważalny. W pierwszym dniu po dotarciu nad Polskę radioaktywnej chmury z Czarnobyla, tj. 28 kwietnia 1986, zawartość radionuklidów w powietrzu w Warszawie wzrosła setki tysięcy razy, a następnie gwałtownie obniżyła się w dniu 1 maja (Rysunek 5). Natomiast średnia moc dawki promieniowania w powietrzu wzrosła w pierwszym dniu zaledwie trzykrotnie w porównaniu z mocą dawki w r. 1985. To nie napromienienie zewnętrzne od radionuklidów zawartych w powietrzu i zdeponowanych na ziemi stanowiło wówczas zagrożenie, lecz obecność wysokich stężeń jodu-131 w powietrzu. Aby uchronić tarczycę dzieci przed napromienieniem gromadzącym się w nich jodem-131 w Polsce przeprowadzono masowe profilaktyczne blokowanie dostępu radioaktywnego jodu do tarczycy, przez wysycenie jej jodem stabilnym, podanym w postaci tzw. "płynu Lugola". Pomiedzy 29 kwietnia a 2 maja profilaktyczną jednorazową dawkę tego płynu otrzymało 10,5 miliona dzieci i 7 milionów dorosłych. Była to największa w historii akcja profilaktyczna przeprowadzona w tak krótkim czasie. Żaden inny kraj nie przeprowadził takiej ochrony ludności przed skutkami awarii w Czarnobylu.

W ciągu ubiegłego wieku zawartość sztucznych radionuklidów w atmosferze zmieniała się zależnie od intensywności próbnych wybuchów jądrowych, a także po awarii w Czarnobylu, z czym wiązały się zmiany ich depozycji na powierzchni Ziemi (Rysunek 6). Emisja ze zniszczonego reaktora jądrowego w Czarnobylu skaziła atmosferę półkuli północnej a także w

minimalnym stopniu południowej: radioaktywny cez-137 z Czarnobyla wykryto w śniegu Bieguna Południowego, a cez-134 w powietrzu na Tahiti i La Reunion. W Polsce wypadek w Czarnobylu podwyższył poziom radionuklidów w powietrzu przyziemnym, w troposferze i stratosferze. W r. 1986 najwyższe skażenie powietrza występowało przy powierzchni Ziemi a najmniejsze w stratosferze. W r. 1990 stężenie cezu-137 w powietrzu przyziemnym i w stratosferzed powróciło do poziomu z przed wypadku w Czarnobylu. Natomiast spadek w czasie stężenia cezu-137 w atmosferze był w latach 1990-ych wolniejszy niż przed wypadkiem w Czarnobylu, co wiązać się może z unoszeniem radioaktywnych pyłów do atmosfery z silnie skażonych terenów Białorusi, Ukrainy i Rosji.

Ponad atmosferą Ziemi występuje zwiększone promieniowanie jonizujące pochodzenia galaktycznego i słonecznego (wysokoenergetyczne protony, neutrony, pozytrony i wszystkie jądra atomowe aż do $Z=92$), a także pasy zwiększonej radiacji (pasy Van Allena), złożone z anizotropowych i wysoko-energetycznych protonów i elektronów schwytych przez pole magnetyczne Ziemi. Energia tych cząstek waha się od kilku eV w przypadku elektronów i neutronów wtórnych do 10^{14} MeV dla jonów z promieniowania galaktycznego. Obecnie około 220 astronautów (160 z USA, 40 Rosjan i 20 z innych krajów) może być narażonych na to promieniowanie. Dziesięcioletni limit dawki na całe ciało przewidziany dla astronautów wynosi, zależnie od płci i wieku, od 400 do 3000 mSv, a więc jest znacznie wyższy od limitu 20 mSv na rok, zalecanego dla "przyziemnego" narażenia zawodowego.

Średni mieszkaniec Ziemi otrzymuje naturalną dawkę promieniowania na całe ciało (dawkę równoważną) wynoszącą około 2,4 mSv rocznie. W wielu rejonach dawki naturalne są wyższe od tej średniej dawki globalnej o dwa rzędy wielkości. Tzw. typowa dawka naturalna waha się od <1 do 10 mSv rocznie. Natomiast w rejonach o podwyższonym tle promieniowania, głównie z powodu zwiększonej zawartości radionuklidów z rodziny uranu i toru, przekracza znacznie te wartości (Tablica 3).

Poza działalnością medyczną aktywność człowieka jedynie w niewielkim stopniu podwyższa średnią globalną naturalną dawkę promieniowania. W Polsce średnia dawka promieniowania od rentgenowskiej diagnostyki lekarskiej wyniosła w r. 2000 0.850 mSv na osobę, od opadu z Czarnobyla i wszystkich innych wypadków jądrowych 0.012 mSv, a od pozostałych sztucznych źródeł promieniowania (próbne wybuchy jądrowe, narażenie zawodowe, zegarki świecące, czujki dymu, loty samolotami itd.) 0.012 mSv. Zatem ze wszystkich źródeł antropogenicznych przeciętny mieszkaniec Polski otrzymał dawkę 0.873 mSv, natomiast ze źródeł naturalnych 2,484 mSv. Łączna średnia dawka naturalna i antropogeniczna wynosi w Polsce 3,36 mSv rocznie.

W ciągu pierwszego roku po awarii w Czarnobylu w kwietniu 1986 mieszkańcy Polski

Tablica 3. Rejony podwyższonego naturalnego tła promieniowania (promieniowanie gamma i kosmiczne łącznie).

Rejon	Charakter rejonu	Dawka pochłonięta w powietrzu (mGy/rok)
Brazylia, Guarapari,	Plaża nadmorska, piaski monazytowe	790
Mineas Gerais, Goias	Miejscowości zamieszkane, intruzje wulkaniczne	25
Pocos de Caldas, Araxa		
Iran, Ramsar	Uzdrowisko, osady źródlane	250
Francja, Lauragais i	Minerały uranu w podłożu, teren zamieszkany	0,1- 870
Lodève, rejon pld.zach.		700
Wewnątrz domu		
Indie, Stan Kerała	Teren zamieszkany, piaski monazytowe	35

otrzymali dodatkową średnią dawkę promieniowania na całe ciało wynoszącą około 0,3 mSv, a w ciągu następnych 70 lat otrzymają z tego źródła łączną dawkę około 1 mSv. Dawki od krótko-życiowego jodu-131 ($T_{1/2} = 8,04$ dnia) na tarczycę dzieci wynosiły w różnych rejonach Polski średnio od 2 do 70 mSv. Około 5% dzieci otrzymało dawkę na tarczycę wynoszącą 200 mSv. W czasie izotopowych badań diagnostycznych dawka na tarczycę od jodu-131 wynosi około 1000 mSv. Takie badania przeprowadzane są w Polsce u około 4000 dzieci rocznie.

W najbardziej skażonych radioaktywnym opadem z Czarnobyla rejonach Białorusi, Ukrainy i Rosji około 190.000 osób otrzymało w latach 1986 - 1995 średnią indywidualną dawkę promieniowania na całe ciało wynoszącą od 4 mSv/rok do 9,2 mSv/rok. Większość z 5 milionów ludności zamieszkującej te rejon napromieniona została dawką około 1 mSv/rok, tj. 40% średniej globalnej dawki naturalnej. Średnie dawki na tarczycę wahały się na Białorusi od 1,4 mGy w rejonie Witebska do 177 mGy w rejonie Homla, w Rosji od 17 mGy koło Orła do 37 mGy koło Briańska, a na Ukrainie od 37 mGy w rejonie Kijowa do 380 mGy w rejonach wokół elektrowni jądrowej w Czarnobylu. Natomiast 381.000 ratowników (tzw. likwidatorów) otrzymało dawki wahaające się od 200 do 500 mSv, a 713 ratowników dawki powyżej 500 mSv.

Antropogeniczne dawki promieniowania na całe ciało otrzymywane w ciągu roku przez ludność Ziemi należy porównać z dawkami naturalnymi. Średnie globalne dawki od prób broni jądrowej w okresie najbardziej intensywnego opadu radioaktywnego w r. 1963 (0.113 mSv), oraz po awarii w Czarnobylu w r. 1986 (0,045 mSv), stanowiły znikomą część dawki naturalnej. Dawka od normalnego funkcjonowania nuklearnego cyklu energetycznego (reaktorów, zakładów produkcji i przerobu paliwa, kopalnictwa uranu, transportu rudy i paliwa, itd.), wynosząca 0.0002 mSv/rok była w r. 2000 ponad 10.000 razy mniejsza od średniej globalnej dawki naturalnej (2,4 mSv/rok) i milion razy mniejsza od dawek naturalnych w niektórych rejonach. Największą antropogeniczną dawkę promieniowania przeciętny mieszkaniec Ziemi otrzymuje od rentgenowskiej diagnostyki medycznej (Rysunek 7).

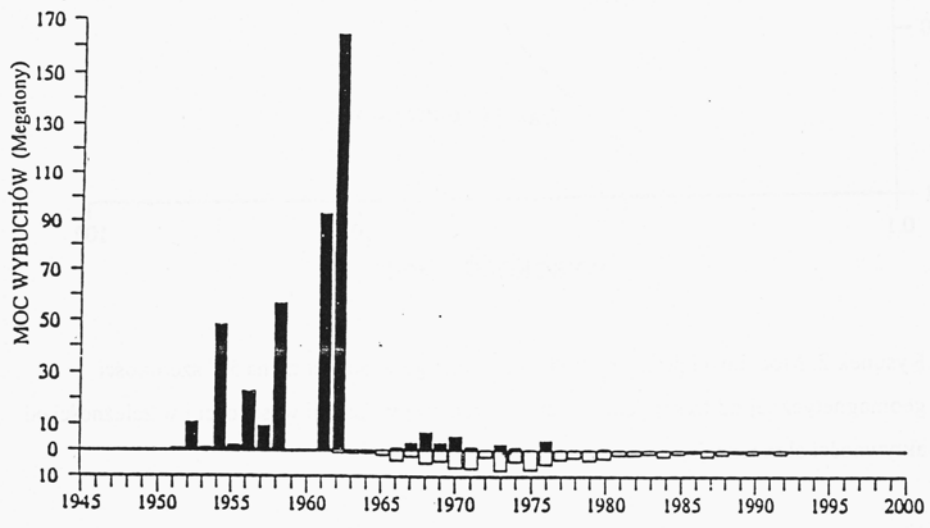
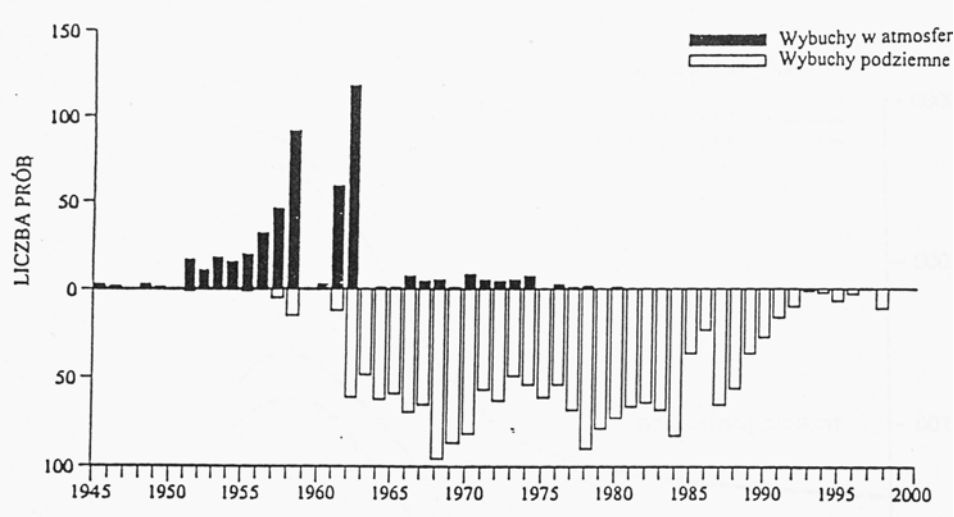
Broń jądrowa stanowi potencjalne źródło śmiertelnego zagrożenia radiologicznego setek milionów ludzi. Jest paradoksem, że uwaga opinii publicznej oraz aktywność mediów i polityków jest od wielu lat skierowana głównie na zwalczanie znikomych, a niekiedy całkowicie wymaganych zagrożeń radiacyjnych, takich jakie niesie energetyka jądrowa w warunkach normalnych, czy jakie przyniosła po wypadku w Czarnobylu, przy jednoczesnym kompletnym braku zainteresowania skutkami wojny jądrowej. Jej możliwość wcale nie została wykluczona, a w arsenałach pięciu mocarstw atomowych i kilku innych krajów znajduje się około 35,000 pocisków nuklearnych. Około 50% energii wyzwolonej w wybuchu jądrowym w atmosferze przypada na fale uderzeniową, 35% na promieniowanie termiczne, 10% na promieniowanie opadu radioizotopów, 5% na promieniowanie natychmiastowe (arbitralnie przyjmuje się, że wyzwala się ono w ciągu 1 minuty), oraz 0.0023% na impuls elektromagnetyczny (EMP). Zasięg terytorialny krótko-terminowych śmiertelnych strat ludzkich od promieniowania natychmiastowego jest mniejszy od zasięgu strat od fali uderzeniowej i termicznej, np. do 5 km po wybuchu o mocy 1 megatony (Mt). Natomiast zasięg strat śmiertelnych nie ukrytej ludności od promieniowania lokalnego i regionalnego opadu radionuklidów (pochodzącego z troposfery) sięga po takim wybuchu do 125 km i obejmuje obszar 1700 km², a ostra choroba popromienna do 1000 km. Ocenia się, że ukrycie ludności w schronach przeciw-opadowych oraz inne środki obrony cywilnej, mogłyby zmniejszyć te straty o 80%. W Polsce nie są prowadzone żadne prace w tym kierunku. Opad stratosferyczny (zwany też opadem światowym), obejmujący obie półkule nie przyniósłby masowych strat śmiertelnych (patrz niżej). Po wybuchu na odpowiedniej wysokości ładunku o mocy 1 Mt niewielka część energii przypadająca na EMP mogłaby spowodować zniszczenie systemów zasilania, telekomunikacji, elektroniki, komputerów, itp. na całej powierzchni USA łącznie z częścią Kanady i Meksyku. To zjawisko działa bardziej hamująco na prowadzenie działań wojennych z użyciem broni jądrowej, niż międzynarodowe traktaty.

W porównaniu ze skutkami ataku jądrowego terytorialny zasięg śmiertelnego zagrożenia radiacyjnego po wypadku w Czarnobylu był znikomy. Jak wynika z Rysunku 8 skażenie terenu dające w pierwszym dniu po wypadku moc dawki promieniowania wynoszącą w 1000 mGy/godzinę sięgała zaledwie do odległości około 1,8 km od płonącego reaktora i pokrywała w dwóch plamach obszar 0.5 km². Na tym obszarze dawka śmiertelna (LD_{50/60}) mogła być osiągnięta już po 3 godzinach. Na granicy miasta Prypeć, w odległości 2,5 km od płonącego reaktora, moc dawki promieniowania była 200 do 1000 razy niższa. Lokalny opad z Czarnobyla nie spowodował żadnych krótko-terminowych strat śmiertelnych wśród ogółu ludności.

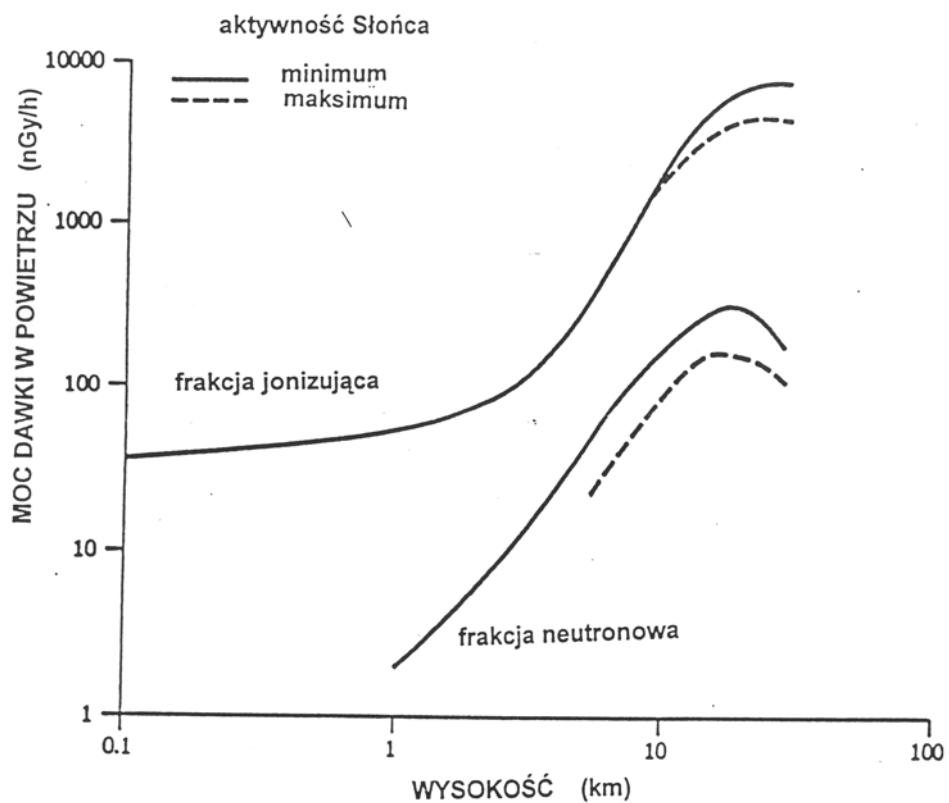
Moc wybuchu 35,000 głowic sięgałaby około 9,000 Mt, tj. tylko 20-krotnie więcej niż moc którą już uwolniono w latach 1945 - 1980 (440 Mt) w czasie 541 próbnych eksplozji jądrowych dokonanych w atmosferze. Od wszystkich prób broni jądrowej otrzymaliśmy średnio w latach 1945 - 1998 łączną dawkę promieniowania wynoszącą 1 mSv na osobę (czyli mniej niż 1% dawki naturalnej zakumulowanej w tym czasie). Po eksplodowaniu całego istniejącego arsenału nuklearnego dawka promieniowania od opadu światowego sięgałaby 20 do 35 mSv, czyli znacznie mniej niż wynosi krótko-terminowa śmiertelna dawka promieniowania (3000 mSv). Często powtarzane twierdzenie, że wojna jądrowa mogłaby doprowadzić do zagłady ludzkości a nawet całego życia na Ziemi jest więc nieprawdziwe, tak jak i podobne twierdzenie, że zagładę tą przyniosłoby rozproszenie w biosferze 200 gramów plutonu. W latach 1945 - 1980 próbne wybuchy jądrowe rozproszyły w atmosferze 3 tony plutonu, bez zauważalnych szkód dla ludzi i innych gatunków.

LITERATURA ZALECANA

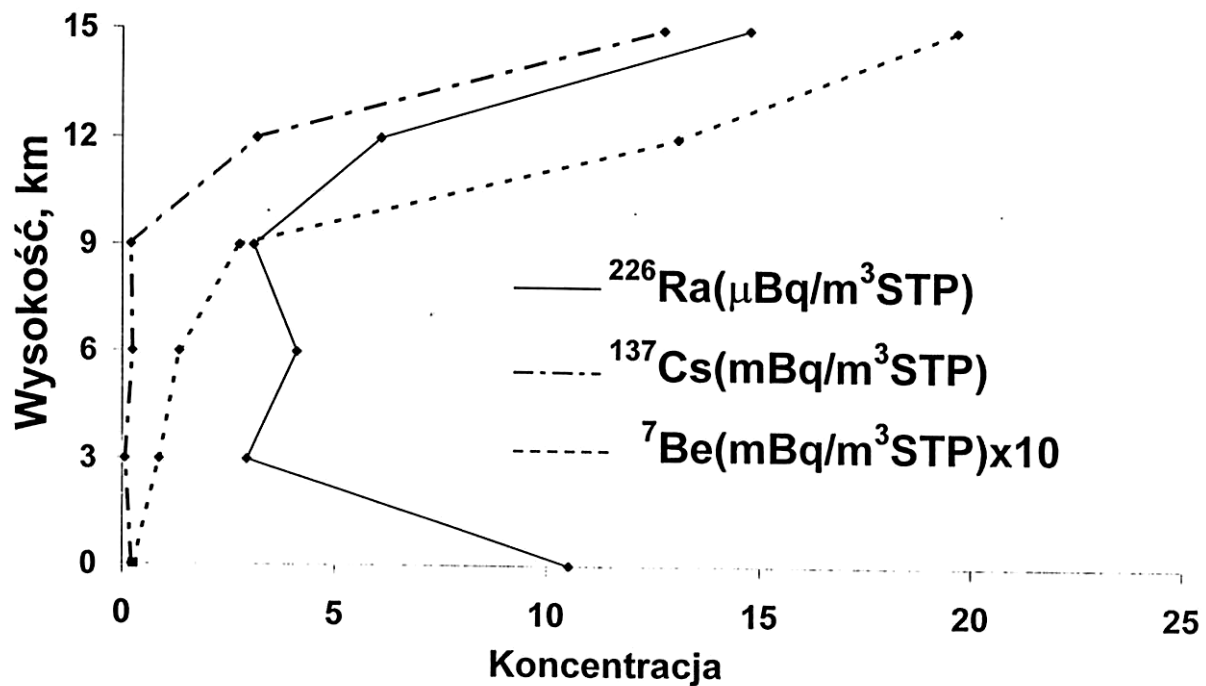
Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, vol. I and II., United Nations, New York, 2000. Str. 1220, dostępne w: www.unscear.org



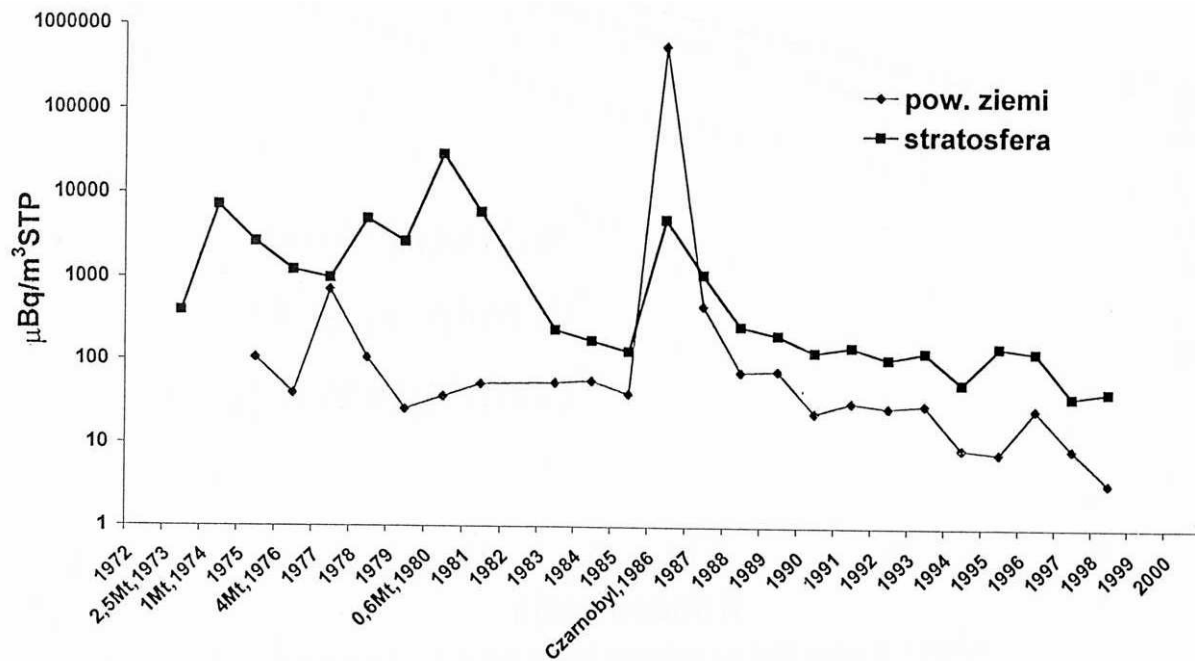
Rysunek 1. Wybuchy jądrowe w atmosferze i pod ziemią.



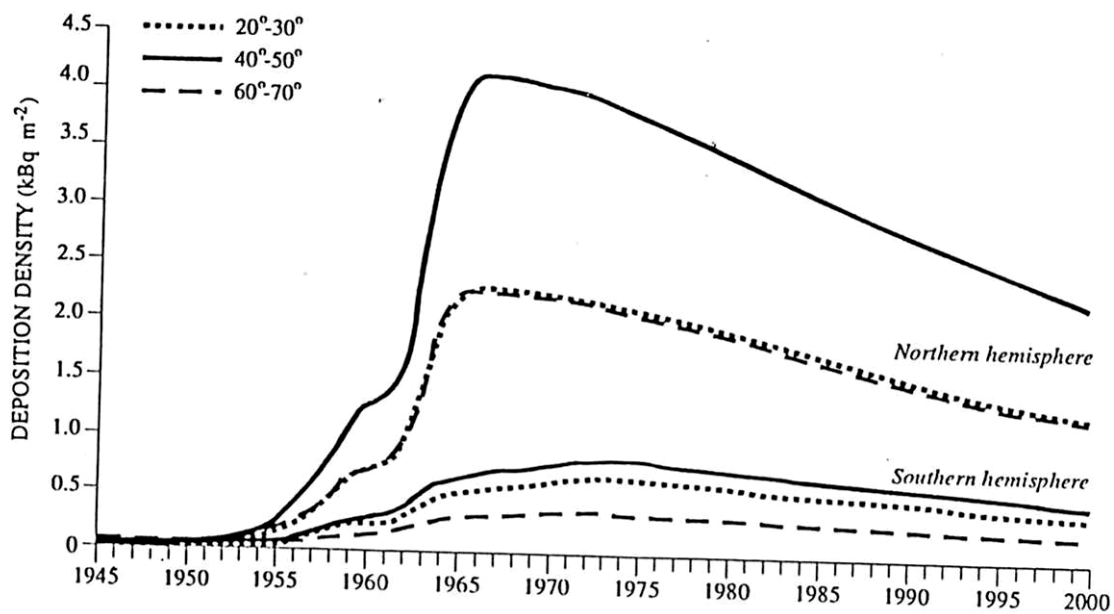
Rysunek 2. Moc dawki promieniowania kosmicznego w powietrzu na 50° szerokości geomagnetycznej od frakcji jonizującej i neutronowej w funkcji wysokości i w zależności aktywności słonecznej.



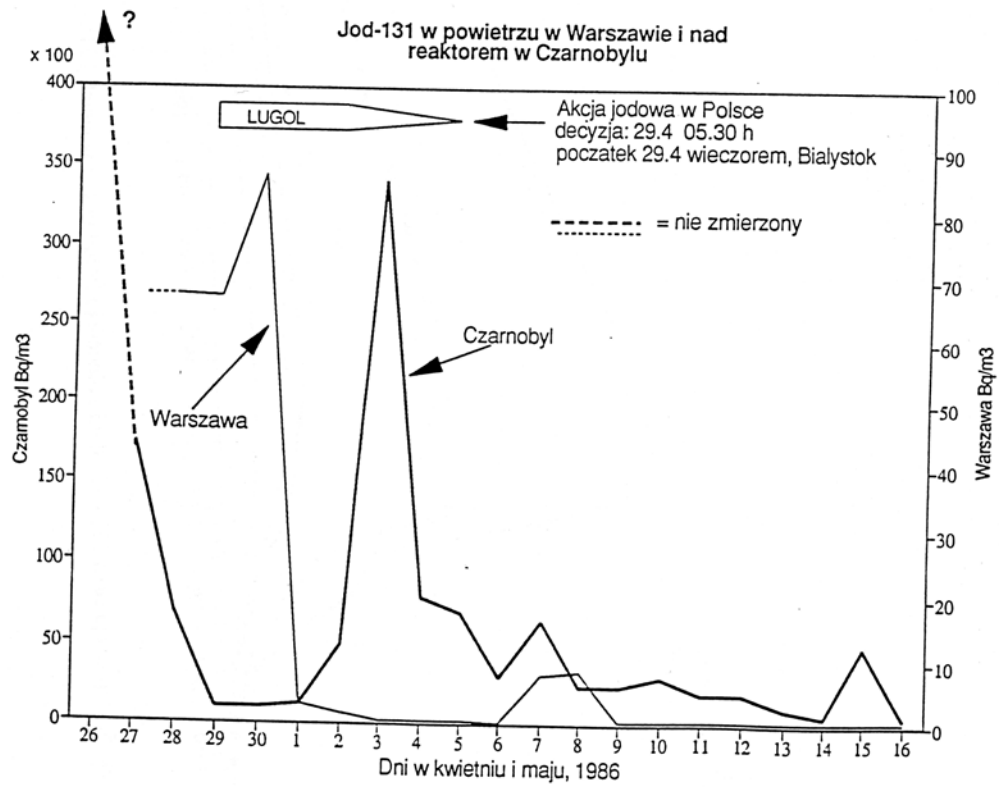
Rysunek 3. Pionowe rozkłady w atmosferze nad Polską radionuklidów ze źródeł naziemnych i stratosferycznych (średnie wieloletnie).



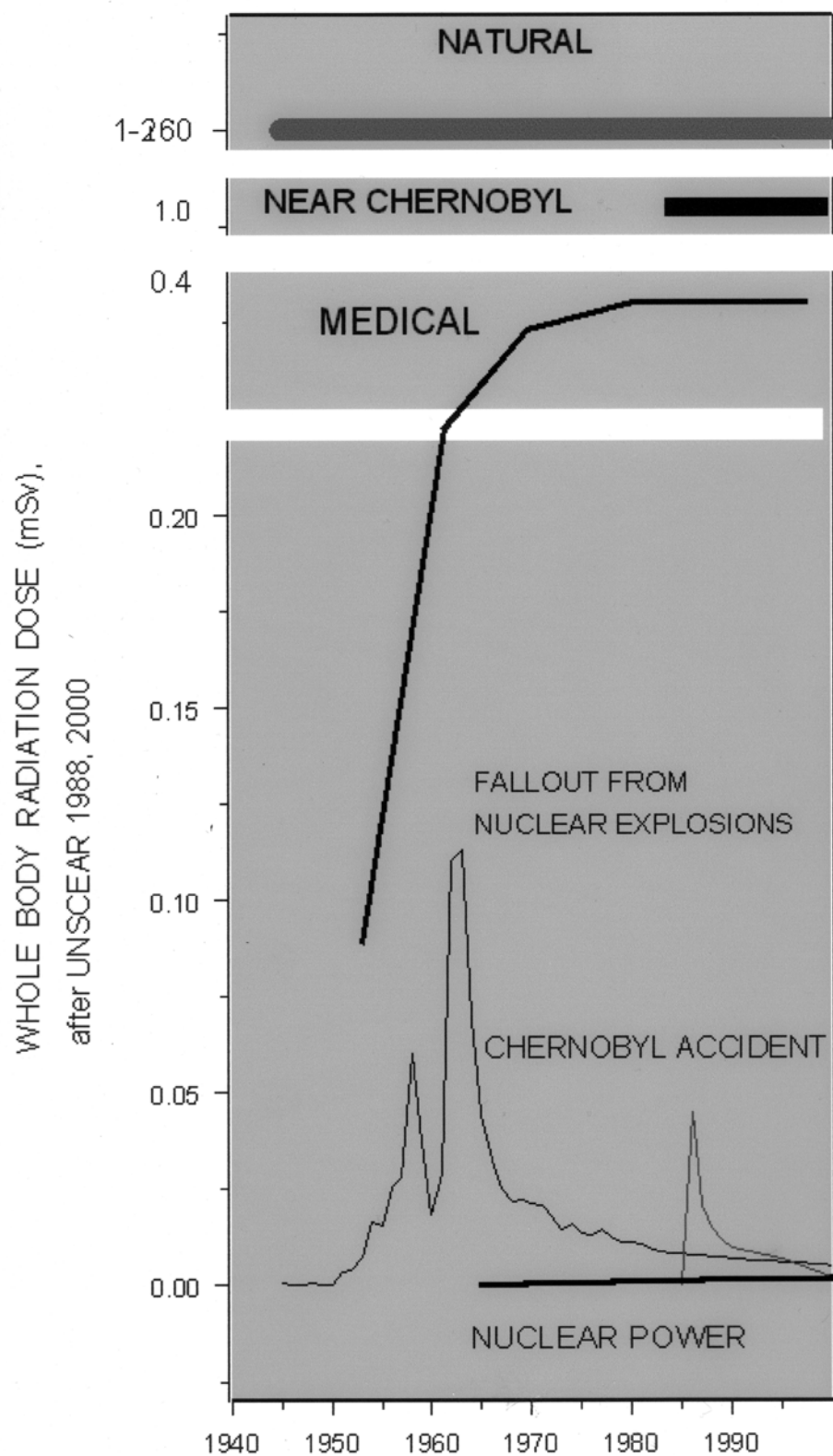
Rysunek 4. Zmiany stężeń radiocezu w powietrzu stratosfery nad Polską (10 – 15 km) oraz przy powierzchni Ziemi. (Mt = moc wybuchów jądrowych w ciągu roku).



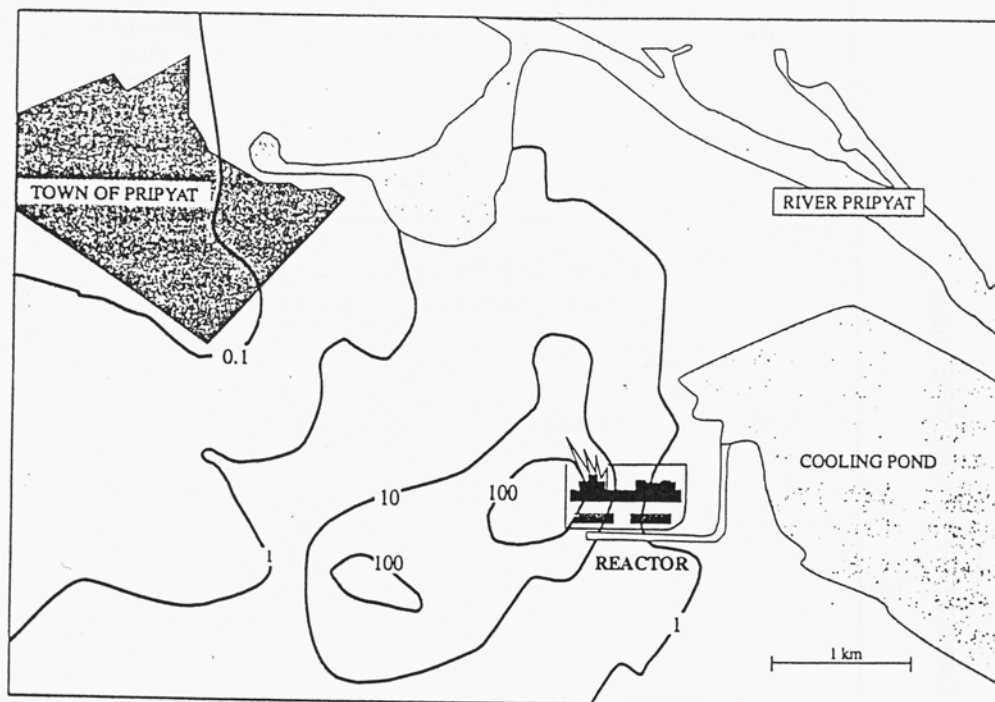
Rysunek 5. Depozycja cezu-137 na Półkuli Północnej i Południowej w latach 1945 - 2000.



Rysunek 6. Jod-131 w powietrzu w Warszawie i nad reaktorem jądrowym w Czarnobylu.



Rysunek 7. Napromienienie populacji Ziemi dawkami naturalnymi i antropogenicznymi w latach 1945 - 2000.



Rysunek 8. Zasięg skażeń radioaktywnych terenu wokół elektrowni jądrowej w Czarnobylu w pierwszym dniu katastrofy 26 kwietnia 1986. Śmiertelne zagrożenie (1000 mGy/h) wystąpiło w dwóch plamach o łącznej powierzchni około 0.5 km^2 , sięgających do odległości 1.8 km od płonącego reaktora. (Izolinie w Gy/h).