

Zagadnienia dozymetrii - wokół katastrofy w Czarnobylu

Przypomnij sobie zanim zaczniesz:	Tego się dowiesz:
• Jakie są rodzaje promieniowania jonizującego i czym są izotopy; • jak wyrazić energię w elektronowoltach eV; • jak zapisać sumę wyrazów poprzez symbol Σ.	• Czym zajmuje się Dozymetria; • jak ocenić zagrożenie od promieniowania jonizującego dla zdrowia; • czy warto leczyć się wodą radonową.

Promieniowanie jonizujące to nic innego, jak strumień cząstek zdolny do jonizacji ośrodka, w którym się przemieszcza. **Jonizacja polega na wybijaniu elektronów z atomów** - elektrony przyjmują dodatkową dawkę energii, która umożliwia im uwolnienie się z pola elektromagnetycznego jądra atomowego. Promieniowanie jonizujące dzielimy na promieniowanie **alfa** (są to jądra helu), **beta** (elektrony i ich antycząstki - pozytony), **gamma** (fale elektromagnetyczne - fotony), **promieniowanie neutronowe** oraz **strumień ciężkich jonów**. Jonizacja zachodzi również w komórkach naszego ciała - badaniem wpływu promieniowania jonizującego na organizm człowieka zajmuje się **dozymetria**.

Źródła promieniowania jonizującego dzielimy na naturalne i sztuczne. Źródłem sztucznym są m.in. badania medyczne, laboratoria naukowe czy elektrownie atomowe. Źródłem naturalnym jest promieniowanie kosmiczne, złoża uranu, czy nawet jedzenie (jednym z intensywniejszych źródeł promieniowania są banany, zawierające duże ilości izotopu K-40!). Ludzki organizm jest więc napromieniany nieustannie.

Dawka pochłonięta

Dawka pochłonięta jest wielkością, która ma pomagać w określeniu szkód, jakie dana wiązka promieniowania jonizującego wywołuje w ludzkim organizmie. Z pewnością szkody te będą tym większe, im więcej energii strumień cząstek przekazał do atomów budujących komórki. **Dawka pochłonięta jest to więc ilość energii zdeponowanej przez wiązkę w kilogramie masy ciała:**

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (1)$$

Wielkość tę możemy zapisać w postaci różniczkowej:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Jednostką dawki pochłoniętej w układzie SI jest grej:

$$Gy = \frac{J}{kg}$$

Odbiornikami energii w ciele człowieka są przede wszystkim elektrony – pozyskują one dodatkową energię i dzięki niej uwalniają się z wiązań chemicznych, a to skutkuje uszkodzeniem komórek.

margines na notatki...

Dawka skuteczna

Wiemy już, że dawka pochłonięta jest wyznacznikiem skali uszkodzeń w ciele człowieka. Zwróćmy teraz uwagę na dwa niezwykle ważne, dodatkowe czynniki.

Przede wszystkim promieniowanie alfa, beta, gamma i neutronowe wybijają elektrony z atomów w inny sposób. Jonizacja w przypadku promieniowania alfa zachodzi o wiele bardziej intensywnie niż w przypadku promieniowania beta, ponieważ jądra helu mają większy ładunek elektryczny niż elektrony. Co więcej fotony w przypadku promieniowania gamma w ogóle nie posiadają ładunku elektrycznego - w tym przypadku mamy do czynienia z jonizacją spowodowaną efektem fotoelektrycznym czy efektem Comptona. Nie wchodząc w szczegóły tych zjawisk, z pewnością możemy stwierdzić, że **deponacja tej samej energii dla różnego rodzaju promieniowania skutkuje różnym poziomem zniszczeń w organizmie**.

Drugim ważnym czynnikiem jest obiekt napromieniania. Różne tkanki i narządy tolerują odmienne dawki promieniowania jonizującego. Tak więc **uszkodzenie tej samej liczby komórek w różnych tkankach i narządach przekłada się na odmienne skutki medyczne**.

Z tych dwóch powodów do oceny wielkości rzeczywistego napromienienia organizmu człowieka niezbędne jest zdefiniowanie **dwóch czynników wagowych** (tabela 1 i 2) oraz wynikającej z nich **dawki skutecznej (efektywnej)**.

Rodzaj promieniowania, energia	Czynnik wagowy promieniowania w_R
Gamma, X	1
Elektrony	1
Neutrony, $E < 1$ MeV	$2,5 + 18,2 e^{-\frac{[\ln(E)]^2}{6}}$
Neutrony, $1\text{MeV} < E < 50\text{MeV}$	$5,0 + 17,0 e^{-\frac{[\ln(2E)]^2}{6}}$
Neutrony, $E > 50$ MeV	$2,5 + 3,25 e^{-\frac{[\ln(0,04E)]^2}{6}}$
Protony	2
Alfa, ciężkie jądra	20

Tabela 1: Czynniki wagowe promieniowania w_R opublikowane w Rozporządzeniu Rady Ministrów[1]. Energie neutronów podane w MeV

Tkanka	Czynnik wagowy promieniowania w_T
Gruzoły piersiowe	0,12
Płuca	0,12
Okreźnica	0,12
Pozostałe tkanki	0,12
Szpik kostny (czerwony)	0,12
Żołądek	0,12
Gonady	0,08
Pęcherz moczowy	0,04
Przełyk	0,04
Tarczycyca	0,04
Wątroba	0,04
Gruzoły ślinowe	0,01
Mózg	0,01
Powierzchnia kości	0,01
Skóra	0,01

Tabela 2: Czynniki wagowe tkanek, narządów w_T opublikowane w Rozporządzeniu Rady Ministrów[1]

Dawkę efektywną otrzymaną przez człowieka otrzymamy jeśli **zsumujemy dawki pochłonięte od każdego rodzaju promieniowania wymnożone przez czynnik wagowy**

dla danej wiązki i przez czynnik wagowy dla danego narządu w którym zaszła deponacja. Możemy to prosto wyrazić wzorem:

$$E_h = \sum_T w_T \sum_R w_R D \quad (2)$$

Dawkę efektywną wyraża się w siwertach Sv (czynniki wagowe są bezwymiarowe):

$$Sv = Gy = \frac{J}{kg}$$

Przykład

W procedurach radiologicznych przyjmuje się, że dawka efektywna otrzymana przez pacjenta podczas tomografii klatki piersiowej wynosi 8 mSv. Jaką energię zdeponowano w kilogramie masy ciała, jeśli przyjąć, że do jonizacji dochodziłoby jedynie w płucach?

Wiemy, że dawka skuteczna wynosi:

$$E_h = 8mSv = 0,008Sv$$

tomograf komputerowy emituje promieniowanie rentgenowskie X, a więc czynnik promienionowania (z tabeli 1.):

$$w_R = 1$$

czynnik dla narządu wynosi (z tabeli 2.):

$$w_T = 0,12$$

korzystając ze wzoru 2. obliczamy dawkę pochłoniętą:

$$E_H = w_T \cdot w_R \cdot D$$

$$D = \frac{0,008}{1 \cdot 0,12} = 0,067Gy$$

Odp. Zdeponowano 0,067 J energii w kilogramie masy ciała (płuca)

Dawki graniczne

Rozporządzenie rady ministrów[2] określa dawki graniczne dla poszczególnych grup ludności. **Dawka graniczna to taka, jaką może przyjąć dana osoba ze źródeł innych niż naturalne oraz medyczne w ciągu roku.** Dla pracowników zawodowo narażonych na działanie promieniowania jonizującego (np. radiolodzy pracujący z aparatami rentgenowskimi, pracownicy laboratoriów, technicy z elektrowniach jądrowych) przyjęto wartość 20 mSv, natomiast dla ogółu ludności – 1 mSv.

Skażenie izotopem jodu I-131 na terenie Polski

Po awarii elektrowni w Czarnobylu najwięcej obaw wzbudzało skażenie izotopem jodu I-131. Jest to izotop charakteryzujący się stosunkowo krótkim okresem półrozpadu (ok 8 dni), przez co najbardziej niebezpieczny jest w pierwszych dniach po skażeniu. Prognozowano, że pierwiastek ten może znacząco wpłynąć na zdrowie ludności. Jod jest wchłaniany do organizmu człowieka z powietrza oraz żywności, po czym tarczyca wykorzystuje go do syntezy hormonów T3 i T4. W związku z powyższym władze państwa, zgodnie z zaleceniami prof. Zbigniewa Jaworskiego, ówczesnego kierownika Zakładu Higieny Radiacyjnej w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, wprowadziły szereg różnorodnych działań m.in. masowo podawano dzieciom płyn Lugola i zakazano wypasu bydła na pastwiskach.

W opracowaniu CLOR „Kroniki i wspomnienia”[4] przedstawiona jest analiza skażeń terenu Polski oraz dawek pochłoniętych przez mieszkańców. Jak podają autorzy analizy, **maksymalna dawka skuteczna sięgała 20 mSv**, co oznacza, że przekroczona została dawka graniczna, dopuszczalna dla ogółu mieszkańców (1 mSv). Nie jest to jednak duża wartość, gdyż 20 mSv to jednocześnie dawka graniczna dla pracowników zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące. Oszacowano również, że **podanie blokady w postaci stabilnego jodu ograniczyło dawki skuteczne o ok 40%**.

Skażenie terenu Polski było bardzo zróżnicowane. **Największe skażenie zarejestrowano tam, gdzie w pierwszych dniach po katastrofie przechodziła chmura promieniotwórcza oraz - co najważniejsze - odnotowano opady deszczu** – rysunek 1.

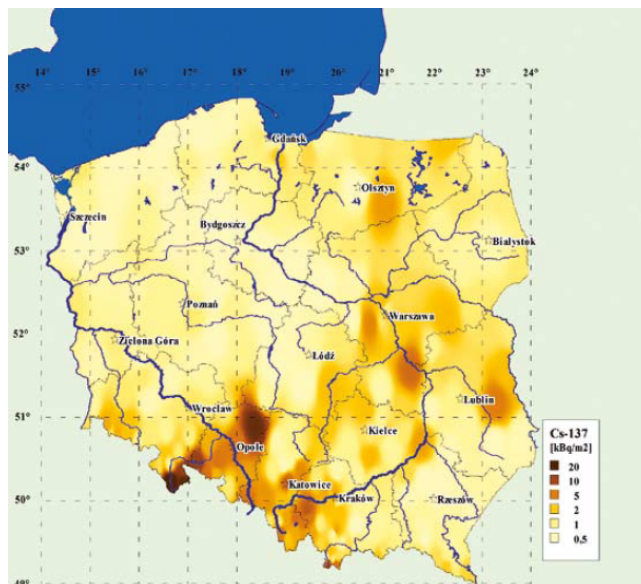
W wywiadzie udzielonym „Polityce”[3] prof. Zbigniew Jaworski przyznaje, że nie zaleciłby podania płynu Lugola, gdyby już wtedy znał rzeczywistą skalę skażenia. Na pytanie o to, co naprawdę groziło Polakom odpowiada, że „zupełnie nic”, gdyż dawka była minimalna, „bez znaczenia dla zdrowia”. Powołuje się przy tym na **hipotezę hormezy radiacyjnej**.

Hipoteza liniowa oraz hormezy radiacyjnej

Wydawać by się mogło, że po okresie detonacji bomb jądrowych podczas drugiej wojny światowej oraz katastrof ekologicznych w elektrowniach jądrowych w Czarnobylu i Fukushima temat wpływu promieniowania jonizującego na organizm ludzki powinien być już gruntownie zbadany. O ile **wpływ dużych dawek promieniowania (jednorazowe przyjęcie kilkuset mSv i więcej) na organizm jest dobrze określony** (przykłady w tabeli 3.), o tyle w zakresie małych dawek nadal istnieje kilka sprzecznych ze sobą teorii.

Dawka efektywna [Sv]	Skutek
0,05 - 0,2	Możliwe efekty późne, możliwe uszkodzenia chromosomów.
0,2 - 1,0	Tymczasowe zmniejszenie liczby białych krwinek.
1,0 - 2,0	Łagodna choroba popromienna w przebiegu kilku godzin: wymioty, biegunka, zmęczenie; zmniejszenie odporności na infekcje.
2,0 - 3,0	Poważna choroba popromienna: wymioty, biegunka, zmęczenie, krwotoki; wypadanie włosów szybkie, w kępach; po 30 dniach śmierć dla 10 – 35% populacji.
3,0 - 4,0	Poważna choroba popromienna; uszkodzenia w szpiku kostnym i jelitach; po 30 dniach śmierć dla 50 – 70% populacji.
4,0 - 10,0	Ostra choroba, szybka śmierć; po 30 dniach śmierć dla 60 – 95% populacji.
10,0 - 50,0	Ostra choroba, szybka śmierć; po 10 dniach śmierć dla 100% populacji.

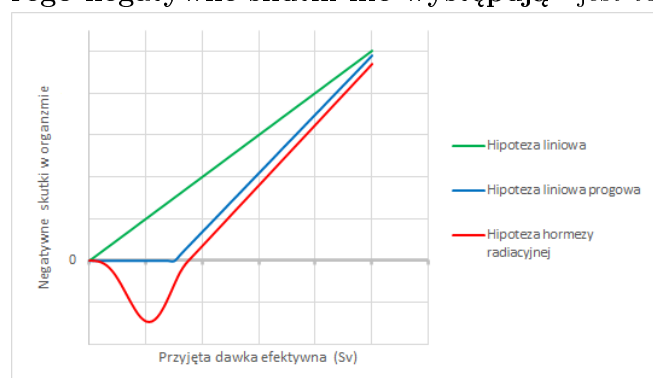
Tabela 3: Wpływ dużych dawek na organizm człowieka. Dawka efektywna, jednorazowe napromienienie całego ciała[6]



Rysunek 1: Skażenie Polski izotopem Cs-137 wg Atlasu Radiologicznego[5]. Najwyższa aktywność występuje w obszarach, w których po katastrofie wystąpiły opady deszczu. Wysoka aktywność jodu I-131 tuż po wybuchu w Czarnobylu występowała w tych samych obszarach. Obecnie I-131 już nie występuje ze względu na krótki okres półrozpadu.

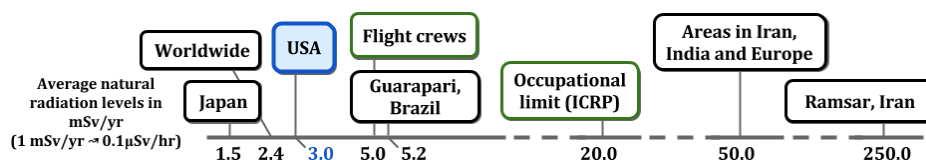
Problem z badaniem wpływu małych dawek promieniowania wynika z przyczyn metodologicznych. Efekty są głównie stochastyczne (np. zwiększenie prawdopodobieństwa zachorowania na raka itp.), a wpływ promieniowania jonizującego trudno jest jednoznacznie wydzielić z szeregu innych czynników. Do tego dochodzi problem z dokładnym określeniem rzeczywistych dawek pochłoniętych czy zebraniem odpowiednio dużej grupy badawczej. Ukazało się już wiele artykułów z wynikami badań, nadal jednak wnioski dotyczą głównie bardzo szczególnych przypadków, takich jak zapadalność na konkretną chorobę określonej grupy ludności. Temat wpływu promieniowania na organizm ludzki jest jednak bardzo złożony i brakuje przekonujących argumentów do uznania którejś hipotezy za prawdziwą.

Na potrzeby ochrony radiologicznej na całym świecie przyjmuje się za słuszną **hipotezę liniową bezprogową**. W jej rozumieniu już **minimalne dawki promieniowania jonizującego powodują negatywne skutki w organizmie**. W praktyce oznacza to, że należy minimalizować narażenie z każdego źródła. To z tą teorią mamy do czynienia na co dzień – wszelkie badania lekarskie wykorzystujące promieniowanie jonizujące (rentgen, CT, PET i inne) są zlecane jedynie w uzasadnionych przypadkach, obowiązują restrykcyjne normy pracy w warunkach narażenia na promieniowanie, a pracownicy otrzymują benefity za pracę w szczególnych warunkach. Z kolei po katastrofie w Czarnobylu wypłacano duże odszkodowania ludności napromienionej nawet niewielkimi dawkami[3]. Istnieją jednak duże problemy z wykazaniem rzeczywistych negatywnych skutków małych dawek na ludzki organizm. Z tego powodu czasem mówi się o **istnieniu pewnego progu dawki efektywnej, poniżej którego negatywne skutki nie występują** – jest to **hipoteza liniowa progowa** (rys. 2).



Rysunek 2: Hipoteza liniowa, liniowa progowa i hormeza radiacyjna - porównanie. Wartości progowe są trudne do określenia, zapewne różnią się dla grup ludzi czy chorób. zniszczenia są naturalnie naprawiane przez organizm, nie ma więc powodów, aby obawiać się niewielkich ilości dodatkowych uszkodzeń.

Za hipotezą liniową progową przemawia bardzo silny argument – **człowiek jest bez przerwy narażony na małe dawki promieniowania od źródeł naturalnych** (promieniowanie tła może mieć na prawdę duże wartości – rysunek 3.) takich, jak naturalne złoża uranu, występujący w glebie i wodzie radon czy promieniowanie kosmiczne. Dodatkowo **niszczący mechanizm działania promieniowania jonizującego na DNA komórek jest taki sam, jak wolnych rodników występujących w ciele człowieka**. Wszystkie te



Rysunek 3: Promieniowanie tła[7]. Na świecie średnia wartość dawki efektywnej od tła to 2,4 mSv/rok. Występują jednak obszary znacznie odbiegające od średniej, np. w irańskim Ramsar to aż 250 mSv/rok! W Polsce jest to 2,5 mSv rocznie, a maksymalna dopuszczalna dawka dla pracownika to 20 mSv/rok

Kolejną hipotezą test **hormeza radiacyjna**. Zgodnie z nią **narażenie na niewielkie dawki promieniowania jonizującego nie tylko nie szkodzi, ale nawet pozytywnie wpływa na zdrowie ludzi** pobudzając naturalne mechanizmy obronne organizmu. Pojawiają się badania mające potwierdzać słusność tej teorii, obarczone są one jednak wspomnianymi wcześniej wadami – trudno jest wyciągnąć ogólne wnioski z bardzo szczególnych, ukierunkowanych badań, często z małą grupą badawczą.

Należy więc **podchodzić z dużą rezerwą do wszelkich komercyjnych sposobów wykorzystywania promieniowania jonizującego jako zdrowotnego**. Takie próby

można łatwo znaleźć w internecie. Popularne w Polsce uzdrowiska reklamują swoje zabiegi wykorzystujące kąpiele w wodzie radonowej oraz zalecają picie takiej wody i inhalacje izotopem radonu. Co gorsze internetowe portale poświęcone zdrowiu również wymieniają szereg zastosowań i chorób, jakie rzekomo leczy woda radonowa. Co prawda ustawa „Prawo geologiczne i górnicze” [8] wspomina, że „wodą leczniczą jest woda podziemna (...) o zawartości (...) radonu – nie mniej niż 74 Bq/dm³”, jednak już na oficjalnej stronie rządowej można przeczytać, że „nie ma progowej dawki, kiedy radon zaczyna stanowić zagrożenie dla zdrowia” [9]. Trudno jest też znaleźć jakiegokolwiek doniesienia naukowe czy zalecenia medyczne dotyczących leczenia radonem konkretnych chorób, a sami autorzy artykułów na stronach internetowych uzdrowisk czy portali poświęconych zdrowiu nie podają źródeł.

Jednym z uzasadnień do stosowania wody radonowej jakie można znaleźć w zasobach internetowych jest to, że woda radonowa zabija bakterie odpowiedzialne za różnego rodzaju choroby. Argument taki jest bardzo wątpliwy - **dawka letalna dla bakterii jest około 1 500 razy większa niż dla człowieka**. Zasadą jest, że im organizm jest "prostszy", tym bardziej odporny na promieniowanie jonizujące. Nie wykluczone, że istnieje jakiś szczególny typ bakterii, które wykazują wyjątkową wrażliwość na promieniowanie alfa, dopóki jednak autor nie podeprze się badaniami, nie ma powodu by temu wierzyć.

Pomimo braku jednoznacznych wniosków co do wpływu małych dawek promieniowania na ludzki organizm, jedno można przyjąć za pewne – **niewielkie dawki promieniowania**, takie jak np. w Polsce po wybuchu w elektrowni jądrowej w Czarnobylu, **nie stanowią dla ludzi większego zagrożenia i nie należy się ich obawiać**. Negatywny wpływ na zdrowie, nawet jeśli występuje, jest trudny do zauważenia na tle innych czynników. Podobnie należy bardzo ostrożnie podchodzić do informacji na temat pozytywnego wpływu promieniowania na zdrowie - biznes chętnie wykorzystuje niewiedzę ludzi do zarabiania pieniędzy.

Twoja kolej

Poszukaj w internecie informacji na temat leczenia chorób wodą radonową. Sprawdź strony internetowe uzdrowisk oraz portale poświęcone zdrowiu. Czy udało Ci się znaleźć wiarygodne informacje na temat skuteczności tego typu terapii?

Literatura

- [1] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20210001657>, dostęp: 25.01.2022
- [2] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego, <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20050200168>, dostęp: 25.01.2022
- [3] Rotkiewicz M., *Zabójczy mit Czarnobyla. Ludzi wcale nie trzeba było przesiedlać*, <https://www.polityka.pl/tygodnikpolityka/klasykipolityki/1514110,1,zabojczy-mit-czarnobyla-ludzi-wcale-nie-trzeba-bylo-przesiedlac.read>, dostęp: 19.01.2022
- [4] *Kroniki i wspomnienia, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej*, https://www.clor.waw.pl/images/pliki/historia_clor/CLOR_final.pdf, dostęp: 19.01.2022
- [5] *Atlas Radiologiczny Polski 2011, CLOR*, http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring_promieniowania_jonizujacego/Atlas_Radiologiczny_Polski_2011.pdf, dostęp: 16.03.2022
- [6] *Radiation effects on humans*, <https://www.atomicarchive.com/science/effects/radiation-effects-human.html>, dostęp: 25.01.2022
- [7] *Background radioation*, <https://radwatch.berkeley.edu/background-radiation/>, dostęp: 25.01.2022
- [8] Ustawa „Prawo geologiczne i górnicze” z dnia 9 czerwca 2011 r. (Dz.U. 2011 Nr 163 poz. 981), <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdU20111630981>, dostęp: 01.02.2022
- [9] *Poznaj radon, Kampania Polskiej Agencji Atomistyki*, <https://www.gov.pl/web/poznajradon/radon-a-zdrowie>, dostęp: 01.02.2022