

V. DAWKI STOSOWANE W MEDYCYNIE NUKLEARNEJ

W niniejszym rozdziale zajmiemy się bardziej szczegółowo sposobami obliczania dawek wewnętrznych, stosowanymi w medycynie nuklearnej¹. Przede wszystkim jednak warto sobie uzmysłwić o jakich wielkościach dawek będziemy mówili. Pewnym punktem odniesienia – ze względów czysto poglądowych - mogą być dawki otrzymywane przez pacjentów w najróżniejszych badaniach z użyciem promieniowania rentgenowskiego. Wielkości te zgromadzone są w Tabelach 5.1 i 5.2². Gwoli przypomnienia: dla mieszkańca Polski średnia roczna dawka od promieniowania naturalnego, to ok. 2,5 mSv.

Poddając pacjenta naświetlaniom możemy rozpatrywać zarówno narażenie całego jego organizmu, jak i narażenie jego poszczególnych narządów.

Tabela 5.1. Uśrednione wartości dawek efektywnych otrzymywanych przez przeciętnego dorosłego pacjenta podczas konwencjonalnych badań rentgenowskich (http://www.radiologyinfo.org/en/safety/index.cfm?pg=sfty_xray; 2012 r.)

Badania:	Przybliżona dawka efektywna:	Porównywalna z promieniowaniem naturalnym w ciągu	** Dodatkowe ryzyko nowotworowe
BRZUCH I OKOLICE:			
Tomografia komputerowa (CT)-Brzuch i miednica	10 mSv	3 lat	Małe
Tomografia komputerowa (CT)-Brzuch i miednica, powtórzenia z i bez materiału kontrastującego	20 mSv	7 lat	Umiarkowane
Tomografia komputerowa (CT)-Kolonografia	10 mSv	3 lat	Małe
Dożylna badania miedniczek nerkowych	3 mSv	1 roku	Małe

¹ R.Chandra, *Nuclear Medicine Physics. The basics*, Williams&Wilkins, (1998)

² wg. F.A.Mettler, W.Huda, T.Y.Yoshizumi, M.Manesh, *Radiology* 248 (2008) 254

Radiografia RTG-dolny odcinek przewodu żołądkowo-jelitowego	8 mSv	3 lat	Małe
Radiografia RTG: Górny odcinek przewodu żołądkowo-jelitowego	6 mSv	2 lat	małe
KOŚĆ:			
Radiografia RTG - Kręgosłup	1.5 mSv	6 miesięcy	b. małe
Radiografia RTG - Kończyny	0.001 mSv	3 godzin	pomijalne
CENTRALNY UKŁAD NERWOWY:			
Tomografia komputerowa (CT)-Głowa	2 mSv	8 miesięcy	b. małe
Tomografia komputerowa (CT)-Głowa, powtórzenie z i bez materiału kontrastującego	4 mSv	16 miesięcy	małe
Tomografia komputerowa (CT)-Kręgosłup	6 mSv	2 lat	małe
KLATKA PIERSIOWA:			
Tomografia komputerowa (CT)-Klatka piersiowa	7 mSv	2 lat	małe
Tomografia komputerowa (CT)-Klatka piersiowa małą dawką	1.5 mSv	6 miesięcy	b. małe
Radiografia klatki piersiowej	0.1 mSv	10 dni	minimalne
STOMATOLOGICZNE:			
Prześwietlenie X w jamie ustnej	0.005 mSv	1 dnia	pomijalne
SERCE:			
Badania naczyń wieńcowych (angiografia) metodą tomografii komputerowej (CTA)	12 mSv	4 lat	małe
Tomografia komputerowa	3 mSv	1 roku	małe

serca pod kątem zwapnień															
OBRAZOWANIE MĘŻCZYZN:															
Densytometria kości (DEXA)	0.001 mSv	3 godzin	pomijalne												
OBRAZOWANIE KOBIET:															
Densytometria kości (DEXA)	0.001 mSv	3 godzin	pomijalne												
Mammografia	0.4 mSv	7 tygodni	b. małe												
<p>Dawki w wypadku dzieci mogą się znacznie różnić od dawek dla dorosłych pacjentów.</p> <p>* Dawki efektywne są typowe dla dorosłych średniego wzrostu. Rzeczywiste dawki mogą się znacznie różnić w zależności od wzrostu pacjenta i rodzaju badań.</p> <p>** Legenda:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Poziom ryzyka</th> <th>Przybliżona wartość ryzyka śmiertelnego nowotworu:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pomijalne:</td> <td>poniżej 1 na 1 000 000</td> </tr> <tr> <td>Minimalne:</td> <td>1 na 1 000 000 do 1 na 100 000</td> </tr> <tr> <td>b. małe:</td> <td>1 na 100 000 do 1 na 10 000</td> </tr> <tr> <td>małe:</td> <td>1 na 10 000 do 1 na 1000</td> </tr> <tr> <td>umiarkowane:</td> <td>1 na 1000 do 1 na 500</td> </tr> </tbody> </table> <p>Uwaga: podane poziomy ryzyka reprezentują mały dodatek do 1 szansy na 5 śmierci nowotworowej każdego z nas.</p>				Poziom ryzyka	Przybliżona wartość ryzyka śmiertelnego nowotworu:	Pomijalne:	poniżej 1 na 1 000 000	Minimalne:	1 na 1 000 000 do 1 na 100 000	b. małe:	1 na 100 000 do 1 na 10 000	małe:	1 na 10 000 do 1 na 1000	umiarkowane:	1 na 1000 do 1 na 500
Poziom ryzyka	Przybliżona wartość ryzyka śmiertelnego nowotworu:														
Pomijalne:	poniżej 1 na 1 000 000														
Minimalne:	1 na 1 000 000 do 1 na 100 000														
b. małe:	1 na 100 000 do 1 na 10 000														
małe:	1 na 10 000 do 1 na 1000														
umiarkowane:	1 na 1000 do 1 na 500														

Tabela 5.2 Typowe wartości dawek dla standardowego pacjenta [F.A.Mettler, W.Huda, T.Y.Yoshizumi, M.Manesh, Radiology 248 (2008) 254]

Rodzaj badania	Dawka [mGy]
Radiografia	
klatka piersiowa	0,1
czaszka	0,1
kręgosłup szyjny	0,2
...kręgosłup lędźwiowy	1,5
kręgosłup piersiowy	1,0
urografia	3,0

jelito cienkie	5,0
Mammografia	0,4
Tomografia komputerowa	
głowy	2
kręgosłupa lędźwiowo – krzyżowego	6
jamy brzusznej	8
angiografia naczyń wieńcowych	16
dentystyczna	0,2
Fluoroscopia	6-8

5.1 Obliczenie dawek wewnętrznych

Obliczanie dawek wewnętrznych jest trudne, gdyż

- efekty biologiczne oceniane są głównie na podstawie ekstrapolacji danych otrzymanych dla zwierząt
- w obliczeniach stosujemy różne przybliżenia; zakładamy np., że rozkład dawki jest jednorodny, że radiofarmaceutyk został wchłonięty przez organizm natychmiast po jego wprowadzeniu, a proces wydalania opisany jest prostym prawem eksponencjalnego zaniku, co nie zawsze jest zgodne z rzeczywistością
- obliczenia stosują się do „człowieka standardowego” z białej rasy kaukaskiej, o wadze 70 kg i o dobrze określonych masach poszczególnych organów oraz żywiącego się wg. dobrze określonej diety
- obliczana dawka dotyczy uśrednień po dużej objętości (ponad 1 cm³), a zatem nie może być użyteczna na poziomie komórkowym (mikrodozymetrii)

W wyniku wymienionych trudności dokładność oceny wartości dawki, to czynnik nawet około 2.

W wypadku dostarczenia pewnej aktywności do narządu wewnętrznego nasze zadanie wygląda następująco: mamy narząd - źródło S (od ang. *source*)

promieniowania X lub gamma, które naświetla jakiś inny narząd - tarczę T (od ang. *target*). Należy ocenić wartość dawki otrzymywanej przez poszczególne narządy.

Przedstawimy wpieryw sposób obliczeń wg tzw. **metody pochłanianej frakcji**. Obliczenia te wykonujemy w następujących czterech krokach, w których obliczamy kolejno:

1. emitowaną moc promieniowania [J/h] dla wszystkich rodzajów promieniowania emitowanego przez radionuklid znajdujący się w narządzie zawierającym źródło
2. tempo absorpcji energii przez narząd docelowy (target)
3. średnią moc dawki
4. średnią dawkę

Pierwsze trzy kroki obliczenia wymagają znajomości danych fizycznych. Ostatni krok – danych biologicznych. Omówimy je po kolei.

Krok 1: Emitowana moc promieniowania

Jeśli źródło wysyła tylko jeden rodzaj promieniowania o energii E [MeV] na rozpad, przy aktywności $1\mu\text{Ci}$ ($3,7 \cdot 10^4$ Bq), emitowana w czasie 1 sekundy energia wynosi $3,7 \cdot 10^4 \cdot E$ [MeV/s] = $2,13 \cdot 10^{-5}$ [J/h]. Moc promieniowania dowolnego źródła wysyłającego szereg energii $\{E_i\}$ z częstotliwościami emisji $\{n_i\}$ wynosi zatem

$$2,13 \cdot 10^{-5} \{n_1 E_1 + n_2 E_2 + \dots\} \text{ [J/h]} \quad (5.1)$$

Gdy aktywność źródła wynosi A [μCi] powyższą wartość należy pomnożyć przez A.

Krok 2: Tempo absorpcji energii

Współczynnik absorpcji (zaabsorbowana frakcja) $\Phi_i(T \leftarrow S)$ jest z definicji stosunkiem energii i-tego promieniowania, zaabsorbowanej przez objętość targetu (T) do energii

promieniowania wysłanego z objętości źródła (S). W większości problemów medycyny nuklearnej źródło i target są tym samym organem i rozważamy więc problem samoabsorpcji (absorpcji własnej).

Tempo pochłaniania energii równe jest mocy wysłanego i-tego promieniowania pomnożonej przez wartość współczynnika absorpcji $\Phi_i(T \leftarrow S)$. Ogólnie

$$2,13 \cdot 10^{-5} \sum_{i=1}^n n_i E_i \Phi_i(T \leftarrow S) [J/h/\mu Ci] \quad (5.2)$$

Wartości $\Phi_i(T \leftarrow S)$ zostały stabelaryzowane dla różnych energii promieniowania X i γ , a także objętości organów źródłowych i docelowych „standardowego człowieka”. Wartości tych współczynników dla samoabsorpcji $\Phi_i = \Phi_i(T \leftarrow T)$ w niektórych narządach podane są w Tabeli 5.3.

Krok 3: Moc dawki

Z definicji, moc dawki, to tempo pochłaniania energii na jednostkę masy narządu (tkanki), a zatem:

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= \frac{2,13 \cdot 10^{-5} A(t) [\mu Ci]}{M} \sum_{i=1}^n n_i E_i \Phi_i(T \leftarrow S) [J/(g \cdot h)/\mu Ci] \equiv \\ &\equiv \frac{A(t)}{M} \sum_{i=1}^n \Delta_i \Phi_i(T \leftarrow S) [Gy/h] \end{aligned} \quad (5.3)$$

gdzie $A(t)$ oznacza aktywność w objętości źródła w chwili t .

Krok 4: Średnia dawka D

Aktywność $A(t)$ zgromadzona w danym narządzie jest z reguły tylko ułamkiem f podanej aktywności A_0 .

$$A(t) = fA_0 e^{-0.693/T_{1/2}(eff)} \quad (5.4)$$

Całkowita dawka D będzie całką z mocy dawki po czasie od zera do nieskończoności. Wynosi ona:

$$D(T \leftarrow S) = 1,44 \cdot T_{1/2}(eff) \cdot \frac{fA_0}{M} \sum_{i=1}^n \Delta_i \Phi_i(T \leftarrow S) \text{ [Gy]} \quad (5.5)$$

Zauważmy, że fA_0/M jest koncentracją aktywności w organie - źródle i to właśnie ta koncentracja, a nie ilość materiału promieniotwórczego determinuje wartość dawki.

Jak widać, aby zminimalizować obciążenie pacjenta dawką należy

- zmniejszać aktywność,
- stosować radiofarmaceutyki z krótkim efektywnym okresem połowicznego zaniku
- stosować radionuklidy o małych wartościach współczynników absorpcji (co oznacza promieniowanie gamma o energiach większych od 100 keV i nie wysyłających promieniowania korpuskularnego)

Tabela 5.3 Ułamek samoabsorpcji ϕ_i dla różnych energii promieniowania γ i różnych narządów

Narząd	Energia [keV]						
	15	30	50	100	200	500	1000
Pęcherz	0,885	0,464	0,201	0,117	0,116	0,116	0,107
Żołądek	0,860	0,414	0,176	0,101	0,101	0,101	0,093
Nerki	0,787	0,298	0,112	0,066	0,068	0,073	0,067
Wątroba	0,898	0,543	0,278	0,165	0,158	0,157	0,144
Płuca	0,665	0,231	0,089	0,049	0,050	0,051	0,045

Trzustka	0,666	0,195	0,068	0,038	0,042	0,044	0,040
Kościec	0,893	0,681	0,400	0,173	0,123	0,118	0,110
Śledziona	0,817	0,331	0,128	0,071	0,073	0,077	0,070
Tarczycyca	0,592	0,149	0,048	0,028	0,031	0,032	0,029
Całe ciało	0,933	0,774	0,548	0,370	0,338	0,340	0,321

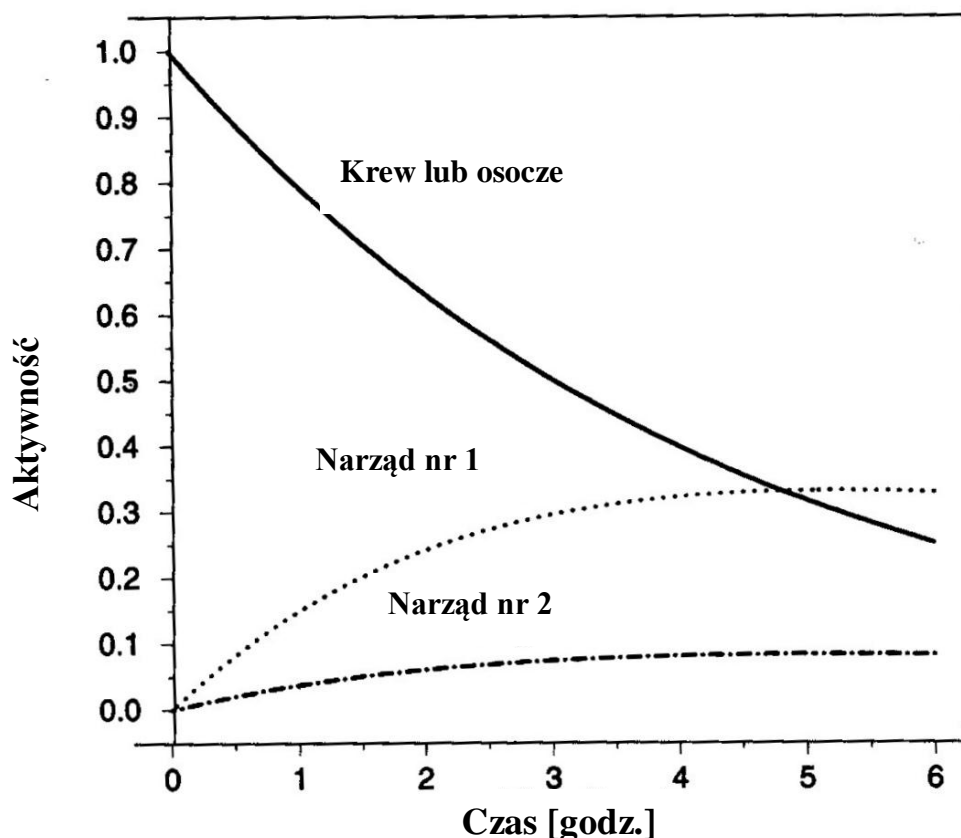
5.2 Aktywność skumulowana

Obliczona w powyższy sposób dawka zakłada:

- natychmiastowe wchłonięcie radiofarmaceutyku przez dany organ (narząd)
- pojedynczy zanik wykładniczy aktywności w źródłowym organie.

Tymczasem rozkład aktywności w funkcji czasu może przebiegać według bardziej skomplikowanego schematu. Na rys. 5.1 pokazujemy schematycznie w jaki sposób zanika w krwi lub osoczu aktywność radiofarmaceutyka podanego dożylnie.

Jak widać, w przypadku krwi lub osocza biokinetyka rozkładu radionuklidu nie pozwala na użycie pojedynczego zaniku wykładniczego. Dla obliczenia dawki należy obliczyć skumulowaną aktywność, tj. scałkować rozkład $A(t)$ po czasie.



Rys. 5.1 Aktywność we krwi lub osoczu z czasem zanika. Część podanej aktywności jest wchłaniana przez narząd 1 i narząd 2. Część podanego radiofarmaceutyka jest wydalana. W wyniku takich procesów żadna z rzeczywistych krzywych zaniku aktywności nie może być opisana pojedynczą eksponentą

5.3 Uprozczone obliczenia dawek

5.3.1 Czynniki S

Fizyczne charakterystyki promieniowania wysyłanego przez radionuklid oraz współczynniki absorpcji dla różnych kombinacji narządu - źródła i narządu - tarczy w „człowieku standardowym” zebrano w postaci tzw. czynnika S:

$$S(T \leftarrow S) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \Delta_i \Phi_i(T \leftarrow S) \quad (5.6)$$

Tak więc

$$D(T \leftarrow S) = 1,44 \cdot f \cdot A_0 \cdot T_{1/2}(\text{eff}) \cdot S(T \leftarrow S) \quad (5.7)$$

W wypadku skomplikowanej biokinetyki należy wpierw obliczyć skumulowaną aktywność. Wtedy:

$$D(T \leftarrow S) = \tilde{A} \cdot S(T \leftarrow S) \quad (5.8)$$

Czynnik S jest jednoznacznie określony dla danego radionuklidu i danej pary organów w człowieku standardowym. Metoda ta nie może być więc stosowana np. do dzieci!

Wartości czynników S, gdy użytym izotopem promieniotwórczym jest ^{99m}Tc podane są w Tabeli 5.4.

Tabela 5.4 Wartości czynników S dla izotopu ^{99m}Tc oraz różnych narządów-źródeł i narządów-tarczy w rad/ $\mu\text{Ci}\cdot\text{godz}$. Aby przejść do jednostek SI [Gy/MBq·godz] należy podzielić wartości w tabeli przez czynnik 3,7.

Organ	Źródło									
	Zawartość pęcherza	Zawartość żołądka	Nerki	Wątroba	Płuca	Szpik czerwony	Kości	Śledziona	Tarczyca	Całe ciało
Ściana pęcherza	1,6e-4	2,7e-7	2,8e-7	1,6e-7	3,6e-8	9,9e-7	5,1e-7	1,2e-7	2,1e-9	2,3e-6
Kości	9,2e-7	9,0e-7	1,4e-6	1,1e-6	1,5e-6	4,0e-6	1,1e-5	1,1e-6	1,0e-6	2,5e-6
Ściana żołądka	2,7e-7	1,3e-4	3,6e-6	1,9e-6	1,8e-6	9,5e-7	5,5e-7	1,0e-5	4,5e-8	2,2e-6
Nerki	2,6e-7	3,5e-6	1,9e-4	3,9e-6	8,4e-7	2,2e-7	8,2e-7	9,1e-6	3,4e-8	2,2e-6
Wątroba	1,7e-7	2,0e-6	3,9e-6	4,6e-5	2,5e-6	9,2e-7	6,6e-7	9,8e-7	9,3e-8	2,2e-6
Płuca	2,4e-8	1,7e-6	8,5e-7	2,5e-6	5,2e-5	1,2e-6	9,4e-7	2,3e-6	9,4e-7	2,0e-6
Szpik	2,2e-6	1,6e-6	3,8e-6	1,6e-6	1,9e-6	3,1e-5	6,6e-6	1,7e-6	1,1e-6	1,1e-6
Jajniki	7,3e-6	5,0e-7	1,1e-6	4,5e-7	9,4e-8	3,2e-6	8,5e-7	4,0e-7	4,9e-9	2,4e-6
Śledziona	6,6e-7	1,8e-5	8,6e-6	9,2e-7	2,3e-6	9,2e-7	5,8e-7	3,3e-4	1,1e-7	2,2e-6
Jądra	4,7e-6	5,1e-8	8,8e-8	6,2e-8	7,9e-9	4,5e-7	6,4e-7	4,8e-8	5,0e-6	1,7e-6
Tarczyca	2,1e-9	8,7e-8	4,8e-8	1,5e-7	9,2e-7	6,8e-7	7,9e-7	8,7e-8	2,3e-3	1,5e-6
Całe ciało	1,9e-6	1,9e-6	2,2e-6	2,2e-6	2,0e-6	2,2e-6	6,6e-7	2,2e-6	1,8e-6	2,0e-6

5.3.2. Przykłady

Aby móc pełni prześledzić rozwiązania podanych w tym paragrafie przykładów musimy wprowadzić **nomenklaturę oznaczeń elektronów Auger'a**, o których wspominaliśmy w rozdziale III, a którą wykorzystujemy tu po raz pierwszy. Przypomnimy, że są to elektrony, które zostają wyemitowane z powłok atomowych na skutek wzbudzenia atomu. Schemat zjawiska jest następujący: elektron z powłoki 1 zostaje wybity ewentualnie ściągnięty do jądra, jeśli jest to akurat powłoka K. Na proces ten zużywana jest energia E_1 elektronu z tej orbity. Na puste miejsce w powłoce 1 przechodzi elektron z wyższej powłoki, 2, na której

jego energia wynosiła E_2 . Pozostała energia zostaje przekazana elektronowi z którejś z wyższych powłok, na których elektron ma energię E_3 i ten zostaje właśnie tym, który nazywamy elektronem Auger'a. Energia kinetyczna tego elektronu będzie więc równa $E_1 - E_2 - E_3$. Taki elektron oznaczamy zwyczajowo jako 123. Np. jeśli elektron został wybity pierwotnie z powłoki K, na którą następnie przeszedł elektron z powłoki L, a inny elektron z tej powłoki został wybity, taki elektron oznaczamy symbolem KLL.

Przejdźmy teraz do przykładów.

Zadanie 1. Obrazujemy wątrobę przy użyciu 2 mCi koloidu siarkowego znaczonego ^{99m}Tc . Zakładamy, że 90% radiofarmaceutyka jest wchłaniane przez wątrobę natychmiast, a efektywny okres połówkowy wynosi 6 godz. Obliczyć dawkę na wątrobę przy pomocy metody współczynników absorpcji. Masa wątroby człowieka standardowego to 1800 g.

Rozwiązanie:

Aktywność początkowa wynosi:

$$A_0 = 0.90 \times 2000 \mu\text{Ci} = 1800 \mu\text{Ci} = 66,6 \text{ MBq}$$

Istotne dla obliczenia parametry wraz z $\Sigma \Delta_i \Phi_i$ podaje Tabela 5.5. Ostatecznie otrzymujemy:

$$D(\text{wątrobę}) = (1800/1800) \cdot 1,44 \cdot 6 \cdot 0,078 = 0,67 \text{ rad} = 6,7 \text{ mGy}$$

Jeśli pozostałe 10% radiofarmaceutyka nie zostanie wydalone z organizmu, będzie także wносиło wkład, choć niewielki, w dawkę otrzymywaną przez wątrobę.

Zadanie 2. Dla warunków zadania 1 obliczyć dawkę na wątrobę i szpik wykorzystując czynnik S.

Z tabeli 5.4 czynników S mamy:

$$S(\text{wątrobę} \leftarrow \text{wątrobę}) = 4,6 \cdot 10^{-5}$$

$$S(\text{szpik} \leftarrow \text{wątrobę}) = 1,6 \cdot 10^{-6},$$

a więc

$$D(\text{wątroba} \leftarrow \text{wątroba}) = 1,44 \cdot 1800 \cdot 6 \cdot 4,6 \cdot 10^{-5} = 0,72 \text{ rad} = 7,2 \text{ mGy}$$

$$D(\text{szpik} \leftarrow \text{wątroba}) = 1,44 \cdot 1800 \cdot 6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} = 0,025 \text{ rad} = 0,25 \text{ mGy}$$

Jak widać, jeśli pacjent nie odbiega zasadniczo od „człowieka standardowego”, posługiwanie się tabelą czynników S bardzo ułatwia rachunki.

Tabela 5.5 Obliczenia sumy $\Delta_i \phi_i$ w zadaniu 1

Rodzaj promieniowania	n_i	E_i [MeV]	$\Delta_i = 2,13 n_i E_i$	ϕ_i	$\Delta_i \phi_i$
γ_1 - Elektron konwersji	0,986	0,002	0,004	1	0,004
γ_2	0,883	0,140	0,264	0,16	0,042
elektron konwersji K	0,088	0,119	0,022	1	0,022
elektron konwersji L	0,011	0,138	0,003	1	0,003
elektron konwersji M	0,004	0,140	0,001	1	0,001
γ_3 - Elektron konwersji	0,01	0,122	0,003	1	0,003
X: K_α	0,064	0,018	0,003	0,88	0,0026
X: K_β	0,012	0,021	-	0,87	-
Elektron Augera KLL	0,015	0,015	-	1	-
Elektron Augera LMM	0,106	0,002	-	1	-
Elektron Augera MXY	1,23	0,0004	-	1	-
					$\Sigma \Delta_i \phi_i = 0,078$

Zadanie 3. Pacjentowi z nadczynnością tarczycy podano 5 mCi ^{131}I . Oblicz dawkę na tarczycę przyjmując, że masa gruczołu tarczycowego wynosi 30 g, efektywny czas połówkowy 4 dni, a wchłonięcie radiofarmaceutyka wynosi 45%.

W człowieku standardowym masa gruczołu tarczycowego wynosi nie 30 g ale 20 g, dlatego też nie możemy używać metody współczynników S.

Z warunków zadania mamy:

$$A_0 = 0,45 \cdot 5000 \mu\text{Ci} = 2250 \mu\text{Ci} = 83,25 \text{ MBq}$$

$$T_{1/2}(\text{eff}) = 4 \text{ dni} = 96 \text{ h}$$

Potrzebne parametry dla izotopu ^{131}I znajdują się w tabeli 5.6. Posługując się tabelą 5.6 otrzymujemy:

$$D(\text{tarczyca}) = (2250/30) \cdot 1,44 \cdot 96 \cdot 0,433 \text{ rad} = 44,89 \text{ Gy}$$

Zwróćmy uwagę, że dawka ta jest głównie spowodowana promieniowaniem korpuskularnym! Dlatego też ^{131}I jest dobrym radionuklidem w terapii, a nie diagnostyce. Zwróćmy także uwagę na wielkość otrzymanej dawki. Jedna dziesiąta tej dawki, podana na całe ciało, byłaby dla człowieka dawką śmiertelną. Tymczasem w odniesieniu do narządu (tu – tarczycy) pełni rolę terapeutyczną.

Tabela 5.6. Obliczenia sumy $\Delta_i\phi_i$ w zadaniu 3

Rodzaj promieniowania	n_i	E_i [MeV]	$\Delta_i = 2,13n_iE_i$	ϕ_i	$\Delta_i\phi_i$
β_1	0,016	0,070	0,002	1	0,002
β_2	0,069	0,095	0,014	1	0,014
β_3	0,005	0,143	0,001	1	0,001
β_4	0,905	0,192	0,369	1	0,369
β_5	0,006	0,286	0,004	1	0,004
γ_1	0,017	0,080	0,003	0,035	-
Elektron Konwersji K	0,029	0,046	0,003	1	0,003

γ_2 – elektron konwersji	0,004	0,129	0,001	1	0,001
γ_3	0,047	0,284	0,029	0,03	-
Elektron Konwersji K	0,002	0,250	0,001	1	0,001
γ_4	0,002	0,250	0,001	1	0,001
γ_5	0,833	0,364	0,646	0,03	-
Elektron Konwersji K	0,017	0,330	0,012	1	0,012
Elektron Konwersji L	0,003	0,359	0,002	1	0,002
γ_6	0,003	0,503	0,003	0,03	-
γ_7	0,069	0,637	0,093	0,03	0,003
γ_8	0,016	0,723	0,025	0,03	0,001
X: K_α	0,038	0,030	0,002	0,15	-
					$\Delta\phi_i=0,433$

5.4 Dawki w rutynowych obrazowaniach

W medycynie nuklearnej, podczas badania dorosłych, wartości dawek na całe ciało, wynikłe z podania radiofarmaceutyku o typowej aktywności od kilku do tysiąca bekereli, wynoszą od 0,01 do ok. 10 mGy, patrz Tabela 5.7. Jednocześnie dawka w *organie krytycznym* (tj. takim, który otrzymuje największą dawkę) w rutynowych obrazowaniach wynosi od kilku do ok. 50 mGy. Wyjątkiem jest badanie tarczycy przy użyciu izotopu ^{131}I , kiedy to tarczyca otrzymuje dawkę 750 mGy. Aby zorientować się w skali wielkości dawki pochłoniętej w badaniach związanych z użyciem różnych radiofarmaceutyków, tabela 5.7 pokazuje wielkości tych dawek w odniesieniu do średniej rocznej dawki pochłoniętej ze źródeł naturalnych (2,5 mSv rocznie).

W wypadku dzieci dozowanie radiofarmaceutyków jest odpowiednio mniejsze ze względu na mniejsze powierzchnie i masy. W rezultacie dawki na konkretny organ

są podobne, choć nie identyczne. Radiofarmaceutyków na ogół nie podaje się kobietom w ciąży. Jeśli jest to niezbędne, sprawą krytyczną jest ocena dawki na płód, zarówno z ciała matki, jak i samego płodu. Przy podaniu 10 mCi (370 MBq) typowe dawki na płód, to 200-400 mrad (2-4 mGy).

Tabela 5.7 Typowe dawki pochłonięte podczas badania narządów wewnętrznych przy użyciu radiofarmaceutyków ^{a)}

Badany narząd	Radiofarmaceutyk	Aktywność znacznika promieniotwórczego [mCi]	Procent dawki pochłoniętej w stosunku do średniej dawki rocznej (2,5 mSv)
Tarczycza	Nadtechnecjan	1	21
Nerki	(^{99m} Tc)	0,04	29
Płuca	Hipuran (¹³¹ I)	4,5	100
Wątroba	Mikrosfery (^{99m} Tc)	4,5	110
Kości	Koloid (^{99m} Tc) Fosfoniany (^{99m} Tc)	15	180

a) L.Królicki, R.Andrysiak, A.Bajera w *Diagnostyka Obrazowa* pod red. B.Pruszyńskiego, PZWL (2000)

5.5. Kilka słów o radiofarmaceutykach

Jest rzeczą oczywistą, że podstawowym wymaganiem w stosunku do związku chemicznego, który wybierzemy jako nośnik naszego izotopu promieniotwórczego (znacznika) jest jego zasadniczo odmienny sposób wchłaniania do narządu w sytuacji patologicznej i normalnej. Nie mniej oczywistą rzeczą jest, że taki radiofarmaceutyk nie może być toksyczny ani pyrogenny (powodujący gorączkę). Kinetyka wchłaniania radiofarmaceutyków jest bardzo różnorodna, a kilka mechanizmów pokazuje tabela 5.8.

Tabela 5.8 Niektóre mechanizmy wchłaniania radiofarmaceutyków

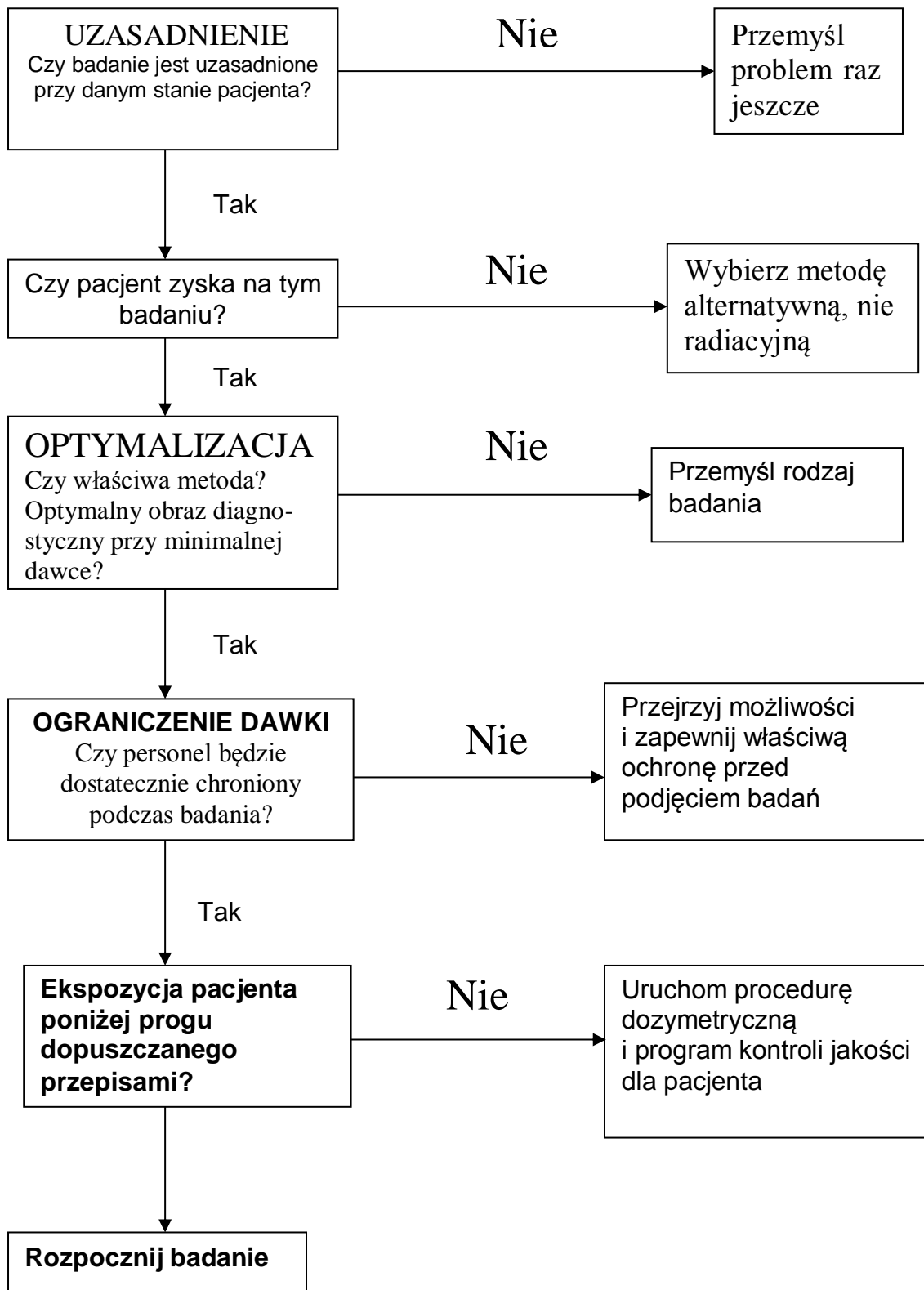
Mechanizm wchłaniania	Przykład
Czynny transport do komórek docelowych	wchłanianie radioaktywnego jodu przez tarczycę
Blokowanie włosowatych naczyń krwionośnych	Scyntygrafia płuc przy użyciu mikrosfer (8 do 75 μm)
Sekwestracja komórkowa	Badania śledziony przy użyciu znakowanych, uszkodzonych termicznie erytrocytów
Prosta wymiana lub dyfuzja	Badania kości przy użyciu związków fosfatowych znakowanych $^{99\text{m}}\text{Tc}$
Znakowanie łożysk naczyniowych	Badanie przepływu krwi w dużych naczyniach i w komorach serca
Procesy immunologiczne	Przeciwciało zawierające znacznik promieniotwórczy, po podaniu dożylnym, łączy się z komórkami zawierającymi odpowiedni antygen. Obrazowanie nowotworu przy pomocy somatostatyny znakowanej ^{111}In .

W tabeli 5.9 pokazujemy najczęściej stosowane radiofarmaceutyki. Pomimo względnie niewielkich dawek z jakimi stykamy się w medycynie nuklearnej lekarz nigdy nie powinien ich lekceważyć. Dlatego też nim podejmie badanie powinien przeprowadzić analizę przypadku wg schematu logicznego przedstawionego na rys. 5.2.

Tabela 5.9 Najczęściej stosowane radiofarmaceutyki ^{a)}

Radiofarmaceutyk	Radioizotop	Badany narząd	Funkcja	Choroba
ECD, HM-PAO	^{99m} Tc	Mózg	Przepływ krwi w mózgu,	Padaczka, udar, otępienie
Jodek sodu, nadtechnecjan sodu	¹²³ I, ¹³¹ I, ^{99m} Tc	Tarczycza	Czynność pompy jodowej	Guzki tarczycy, jodochwytność
Leukocyty	¹¹¹ In, ^{99m} Tc	Całe ciało	Procesy zapalne	Ropnie, ogniska zapalne
Somatostatyna	¹¹¹ In	Obecność receptorów dla somatostatyny	Guzy nowotworowe zawierające ten typ receptora	Procesy nowotworowe
Chlorek talu, MIBI	²⁰¹ Tl, ^{99m} Tc	Serce	Przepływ krwi w mięśniu sercowym	Choroba wieńcowa, zawał serca
Mikrosfery, makroagregaty	^{99m} Tc	Płuca	Przepływ krwi w płucach	Zatorowość płuc
Koloid siarczkowy	^{99m} Tc	Wątroba, śledziona, szpik kostny	Czynność układu siateczkowo - śródbłonkowego	Marskość i nowotwory wątroby
DTPA	^{99m} Tc	Nerki	Czynność kłębuszków nerkowych	Stany zapalne nerek, niewydolność, zaburzenia w odpływie moczu
Cytrynian galu	⁶⁷ Ga	Wątroba i inne narządy		Zapalenia, nowotwory

^{a)} L.Królicki, R.Andrysiak, A.Bajera w *Diagnostyka Obrazowa* pod red. B.Pruszyńskiego, PZWL (2000)



Rys. 5.2 Schemat podejmowania decyzji o badaniu przy użyciu izotopów promieniotwórczych