

OCENA NARAŻENIA WEWNĘTRZNEGO CZŁOWIEKA SKAŻONEGO SUBSTANCJAMI γ -PROMIENIOTWÓRCZYMI NA PODSTAWIE POMIARÓW „IN VIVO”.

Bogdan Filipiak, Zbigniew Haratym, Tomasz Pliszczyński.

Instytut Energii Atomowej, Ochrona Radiologiczna i Służba Awaryjno - Dozymetryczna

Received June 21st, 2000; revised version received November 6th, 2000; accepted March 28th, 2001

STRESZCZENIE

In a large number of operations carried out in medicine, industry and nuclear facilities, as well as in emergencies, situations occur when the skin becomes a critical organ in persons occupationally exposed to a radiation hazard. Individual monitoring, which makes it possible to determine the directional dose equivalent H' (0.07, ∇) from superficial contamination of the human body, is not an easy or fast measurement.

A method is presented of estimating the human skin radioactive hazard, based on measurements carried out with operational monitoring equipment.

WSTĘP

Narażenie na promieniowanie jonizujące towarzyszy ludziom od zarania dziejów, bowiem w skorupie ziemskiej oraz atmosferze znajdowało i znajduje się cały szereg naturalnych pierwiastków radioaktywnych. Obecność izotopów promieniotwórczych powoduje określone narażenie ludzi, jednak jest ono pomijalne w stosunku do innych zagrożeń. Ostatnie stulecie przyniosło ogromny postęp naukowy, a jednym ze znaczących osiągnięć było rozszczepienie atomu i produkcja sztucznych izotopów promieniotwórczych. Tak więc, do standardowego acz nieświadomego narażenia doszedł następny czynnik: zagrożenie od źródeł wytworzonych przez człowieka. Aktualnie całkowite narażenie poszczególnych osób z ludności, dla obszaru Polski, wyrażane przez efektywny równoważnik dawki obciążającej na całe ciało wynosi ok. 3,5 mSv/rok. Jedynie niewielka część dawki (0,8 mSv/rok) pochodzi od sztucznych izotopów i urządzeń wytwarzających promieniowanie jonizujące, w tym 0,7 mSv to narażenie od źródeł medycznych.

Narażenie może być dwojakiego rodzaju: **zewnętrzne**, tzn. takie, gdzie źródło promieniowania znajduje się poza organizmem narażonego i **wewnętrzne**, gdy jest ono w ciele człowieka.

W sytuacjach awaryjnych dużych źródeł promieniowania, na skutek rozprzestrze-

nienia się skażeń promieniotwórczych może jednak wystąpić poważne zagrożenie radiologiczne dla grup ludności zamieszkałych w otoczeniu tego źródła. Ma to zazwyczaj miejsce, kiedy duże źródła lub ich bariery bezpieczeństwa radiacyjnego zostaną uszkodzone, a kwalifikacje osób decydujących o wykorzystaniu tych źródeł są niewielkie. Dotyczy to źródeł stosowanych w przemyśle, medycynie czy nauce. Takie zdarzenia w ostatnich latach miały miejsce w Czarnobylu, dawny ZSSR; Cindat Juarez, Meksyk; Gojana, Brazylia i Tammik, Estonia [1]. W normalnych warunkach eksploatacji, prawdopodobieństwo zaistnienia takich stanów jest niewielkie.

Od momentu odkrycia promieniowanie znalazło szerokie zastosowanie m.in. w medycynie przynosząc ludzkości nieocenione korzyści. Początkowo w diagnostyce a następnie także w terapii. Z czasem wykształciły się oddzielne specjalności medyczne takie jak: radiologia i medycyna nuklearna [2].

W różnych zakładach medycyny pracują tysiące osób zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące. Wszystkie one są objęte kontrolą narażenia zewnętrznego, a osoby, które pracują z otwartymi źródłami promieniowania powinny być także, objęte kontrolą narażenia wewnętrznego.

Naszym celem jest przedstawienie 35-letnich doświadczeń i możliwości monitoringu

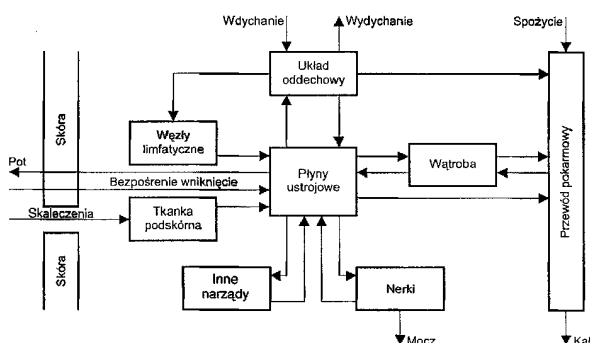
narażenia wewnętrznego wykonywanego przez Ochronę Radiologiczną i Służbę Awaryjno-Dozymetryczną Instytutu Energii Atomowej w Świerku.

Podstawowe pojęcia dotyczące narażenia wewnętrznego

Podstawowym celem monitoringu narażenia wewnętrznego jest zapewnienie odpowiedniego stopnia bezpieczeństwa przy wykorzystywaniu otwartych źródeł promieniotwórczych.

Indywidualny monitoring dla oszacowania wniknięcia radionuklidów do organizmu może wykorzystywać jedną lub więcej z niżej podanych technik:

- a) **bezpośredni pomiar radionuklidów w organizmie lub narządzie/tkance** za pomocą Licznika Promieniowania Ciała Człowieka (LPCC) albo Licznika Promieniowania Tarczycy (LPT). Pomiary te opierają się na detekcji promieniowania przenikliwego (X, γ) dokonywanej z zewnątrz organizmu;
- b) **pomiar radionuklidów w wydzielinach** i oszacowanie wniknięcia radionuklidu przy wykorzystaniu danych z metabolizmu człowieka standardowego;
- c) **pomiar stężenia radionuklidu w powietrzu lub w otaczających mediach** (woda, pożywienie, gleba, itp.).



Rys. 1. Uproszczony schemat dróg wnikania i przemian się materiałów radioaktywnych w organizmie człowieka.

Pomiary te muszą być interpretowane w pojęciach: **wniknięcia radionuklidów, równoważnika dawki obciążającej i efektywnego równoważnika dawki obciążającej.**

Oszacowanie może zależeć od tego, czy wniknięcie było jednorazowe czy ciągłe (chroniczne).

- * **Wniknięcie radionuklidu** oznacza wprowadzenie określonej ilości substancji promieniotwórczej do organizmu człowieka. Podstawowymi drogami wniknięcia są:
 - inhalacja (wdychanie),
 - droga pokarmowa (spożycie),
 - przenikanie przez kontakt (bezpośrednie wnikanie),
 - uszkodzenia skóry (skaleczenia)*

- * **Wchłonięcie** oznacza wprowadzenie do organizmu lub narządu/tkanki materiału promieniotwórczego przenoszonego po jego wniknięciu do organizmu i jego osadzenie. Materiał ten jest roznoszony w organizmie przez płyny ustrojowe.

- * **Usuwanie materiału promieniotwórczego** z organizmu następuje z moczem lub kałem, a w przypadku niektórych radionuklidów również z potem.

Na rys.1 podano uproszczony schemat biokinetyki materiału promieniotwórczego w organizmie ludzkim.

- * **Równoważnik dawki obciążającej**
Dawka pochłonięta od zewnętrznego promieniowania jest dostarczana w tym samym czasie, kiedy organ lub tkanka podlega ekspozycji od zewnętrznego źródła promieniowania.

Natomiast dla narażenia wewnętrznego od zawartych w tkance radionuklidów, całkowita dawka będzie zwiększała się w czasie i będzie dostarczana w czasie trwania pełnego rozpadu radionuklidów. Biorąc pod uwagę tę zależność czasową International Commission on Radiological Protection (ICRP) zdefiniowała **równoważnik dawki obciążającej**, który będzie otrzymywany przez osobę w wyniku wprowadzenia materiału promieniotwórczego do jej organizmu. ICRP przyjęło arbitralnie 50 lat jako maksymalny czas gromadzenia dawki dla osób pracujących.

Stąd definicja:

$$H_{50} = \int_{t_0}^{t_0+50} \dot{H}(t) dt$$

gdzie:

t_0 - czas wprowadzenia materiału promieniotwórczego,

$\dot{H}(t)$ - moc równoważnika dawki w tkance lub narządzie w czasie t .

* Efektywny równoważnik dawki obciążającej (H_{EF50})

Jeżeli równoważnik dawki obciążającej tkanki lub narządu, powstający z wniknięcia materiału promieniotwórczego do organizmu, jest pomnożony przez odpowiednie współczynniki wagowe narażenia tych tkanek W_T , to wtedy sumując je, otrzymamy efektywny równoważnik dawki obciążającej. Ta wielkość jest miarą całkowitego ryzyka somatycznego lub efektów dziedziczności dla poszczególnej osoby i jego potomków, od wniknięcia materiału promieniotwórczego związanego z ryzykiem napromieniowania w kolejnych latach, powstałego w wyniku tego wchłonięcia. Wartości W_T podano w tabeli 1.

Tab. 1. Wartości czynnika wagowego W_T dla różnych narządów

Narząd lub tkanka	Czynnik wagowy tkanki, W_T
Gonady	0,20
Czerwony szpik kostny	0,12
Jelito grube	0,12
Płuca	0,12
Żołądek	0,12
Pęcherz	0,05
Gruzoły piersiowe	0,05
Wątroba	0,05
Przelyk	0,05
Tarczycyca	0,05
Skóra	0,01
Powierzchnia kości	0,01
Pozostałe	0,05

* Modele biokinetyki przyjęte przez ICRP

W celu oszacowania wtórnych poziomów granicznych, poziomów interwencyjnych itp. dla personelu, ludności i pacjentów, ICRP przyjęła biokinetyczne modele wniknięcia materiału radioaktywnego drogą pokarmową i oddechową oraz wydzielenia z moczem - model nerkowo-moczowy. Ujęto to w Publikacjach 30 [3], 54 [4], 56 [5], 67 [6], 69 [7] i 71 [8]. W modelach tych

poszczególne organy w ciele ludzkim zostały potraktowane jako oddzielne moduły, gdzie odpowiednie funkcje pochłaniania lub transportu określają metabolizm przemian.

Dla każdego radionuklidu został określony efektywny okres połowicznego zaniku (T_{EF}) jako:

$$T_{EF} = \frac{T_B \cdot T_{1/2}}{T_{1/2} + T_B}$$

gdzie:

T_B - biologiczny okres połowicznego zaniku,

$T_{1/2}$ - fizyczny okres połowicznego zaniku.

Stąd można określić wskaźniki pochodne w postaci rocznych granicznych wniknięć radionuklidów do organizmu, które to wartości, dla osób zatrudnionych w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące, zostały podane w zarządzeniach wykonawczych do Prawa Atomowego.

Obowiązujące limity

Zgodnie z Prawem Atomowym i jego zarządzeniami wykonawczymi, pracowników zawodowo narażonych obowiązują następujące ustalenia i dawki graniczne:

- roczna wartość graniczna efektywnego równoważnika dawki obciążającej - 50 mSv,
- roczna wartość graniczna równoważnika dawki obciążającej dla tarczycy - 500 mSv,
- napromieniowanie pracownika, który otrzymał dawkę większą od rocznej granicznej, nie przekraczającą jednak pięciokrotnie tej wartości powinno być w dalszej pracy ograniczone w taki sposób, aby łączna dawka w dowolnym okresie kolejnych sześciu lat, obejmujących rok zwiększonego napromieniowania, nie przekroczyła sześciokrotnej dawki granicznej.

METODY POMIARÓW SKAŻEŃ WEWNĘTRZNYCH SUBSTANCJAMI γ -PROMIENIOTWÓRCZYMI

Uwarunkowania stosowanych metod pomiarowych

Przed rozpoczęciem pomiaru należy znać następujące dane:

- czas i drogę wniknięcia radionuklidu do organizmu,
- wiek, wagę, wzrost i płeć pacjenta,
- określić czy nie występują skażenia powierzchniowe ciała i odzieży (mycie i przebranie jest niezbędne - w wypadku trudności w dekontaminacji ciała, należy dokładnie określić rodzaj, miejsce i wielkość skażenia).

Przy wyborze metody pomiarowej do oceny narażenia wewnętrznego należy uwzględnić:

- metody monitoringu mediów (powietrza, opadu, pożywienia itp.) z otoczenia człowieka – są one zalecane w zakresie ustalania limitów dla procedur dotyczących miejsc pracy oraz prognozowania narażenia w warunkach założonych scenariuszy awaryjnych. Jednak bazując na tych pomiarach, dokładność oszacowania narażenia nie może przekraczać zazwyczaj rzędu wielkości, głównie na skutek nieznaności funkcji zmienności stężenia mediów w okresie i miejscu narażenia, rozróżnienia dróg wniknięcia, rodzaju diety itp. A więc ta metodyka zalecana jest przede wszystkim dla prognozowania oceny zagrożenia personelu lub populacji;
- metody monitoringu wydzielin człowieka (głównie moczu) - są stosowane zarówno w sytuacjach diagnostyki personelu przy narażeniu ciągłym jak i sytuacjach incydentalnych, zwłaszcza dla radionuklidów beta i alfa promieniotwórczych. Przy znaczących wniknięciach celem jest prowadzenie pomiarów powtarzanych w odstępach czasu odpowiednio dobranych do wielkości T_{EF} . Zwłaszcza jest to istotne, gdy stosowano środki wewnętrznej dekontaminacji. Procedura przygotowania próbki zawiera odpowiednią obróbkę chemiczną i dla niektórych radionuklidów trwa do kilku dni.
- metody monitoringu radionuklidów „in vivo” poprzez detekcję zewnętrznego promieniowania X i gamma. Jest to podstawowa metoda diagnostyczna dla określenia narażenia wewnętrznego, co wynika z faktu, iż ok. 90% radionuklidów występujących w otoczeniu człowieka jest γ -promieniotwórczych. Podobnie jak w poprzedniej metodyce przy znaczących wniknięciach celem jest prowadzenie pomiarów powtarzanych w odstępach czasu odpowiednio dobranych do wielkości T_{EF} . Najbardziej rozpowszechnionymi sposobami oceny

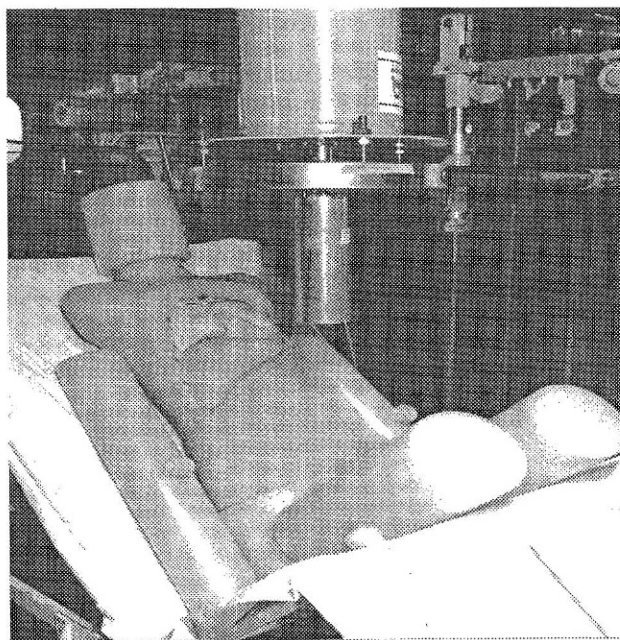
narażenia i dostępnymi w Instytucie Energii Atomowej w Świerku są: Licznik Promieniowania Ciała Człowieka, który określa aktywność w całym ciele lub narządzie/tkance oraz Licznik Promieniowania Tarczycy.

- bardzo istotnym elementem warunkującym prawidłowość pomiaru aktywności i wykonywania ocen narażenia we wszystkich tych metodach pomiarowych jest kalibracja tych urządzeń. Dla przeprowadzonej odpowiedniej kalibracji wymagana jest znajomość nie tylko dokładnej aktywności źródła, jego reprezentatywna postać fizyko-chemiczna, ale także geometria pomiarowa z uwzględnieniem odpowiedniego kształtu fantomu, który w przypadku pomiarów „in vivo” winien być równoważny tkance.

Licznik LPCC

Urządzenie to służy do pomiarów skażenia całego ciała, poszczególnych narządów oraz pomiarów scanningowych mających na celu przestrzenną lokalizację skażenia w organizmie.

W jego skład wchodzi kabina osłonna wraz z leżanką oraz spektrometryczny zestaw pomiarowy z detektorem germanowym o dużej wydajności i detektorem scyntylacyjnym NaI(Tl) o objętości 6 dcm³ do pomiarów scanningowych.



Rys. 2. Lpcc, geometria pomiarowa typu „krzesło, fantom BOMAB z korpusem antropomorficznym” (bez okrywy piersiowej).

Typowy rutynowy pomiar wykonuje się w geometrii tzw. „krzesła” (rys.2). Trwa dwa-dzieścia minut co pozwala wykrywać w organizmie, dla większości radionuklidów, aktywność na poziomie kilkudziesięciu Bq, np. próg detekcji dla ^{137}Cs wynosi ok. 35 Bq. Wzorcowanie dla tego typu pomiarów wykonywane jest przy założeniu, że skażenia są równomiernie rozmieszczone w organizmie.

Do kalibracji LPCC używa się wielu fantomów mających symulować człowieka. Do najpopularniejszych należy fantom typu BOMAB (rys. 2). W wersji podstawowej przedstawia on tzw. standardowego człowieka (mężczyznę – wzrost 170 cm, waga 70 kg). Nasze laboratorium stosuje do swoich wzorcowań rozbudowaną rodzinę fantomów BOMAB, symulujących sylwetkę człowieka od 155 cm wzrostu i 55 kg wagi do odpowiednio 190 cm i 110 kg. Ten typ fantomu dobrze odwzorowuje przypadek jednorodnego rozkładu izotopu w całym ciele. Dla sytuacji gdzie izotop kumuluje się w narządzie krytycznym lepsze rezultaty osiąga się stosując fantom antropomorficzny lub BOMABo-podobny fantom wykonany z plexi.

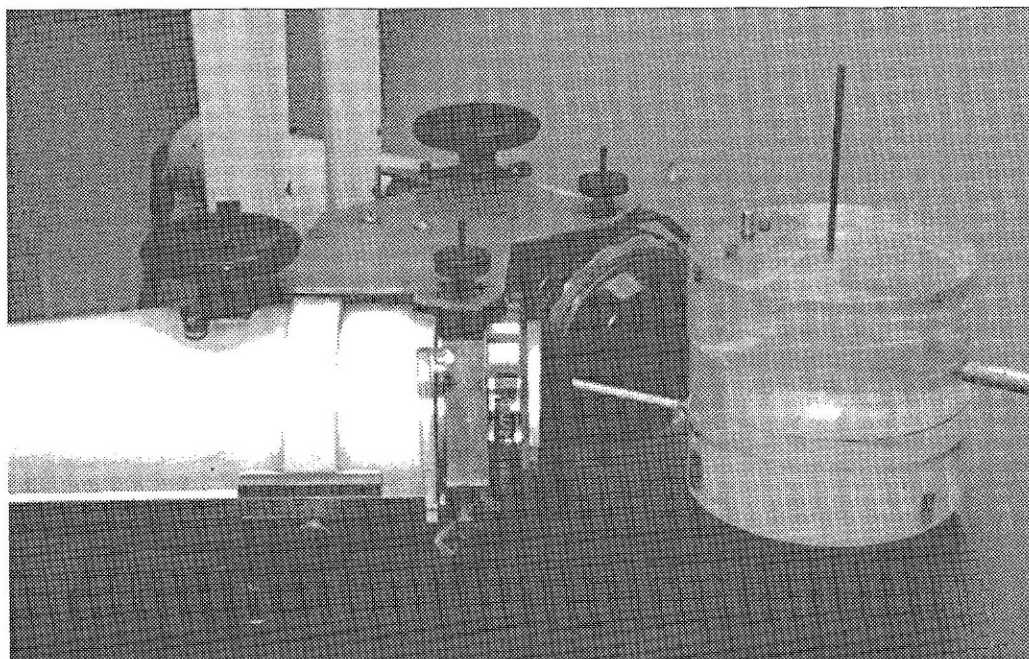
Antropomorficzny fantom korpusu człowieka standardowego jakim dysponuje nasze laboratorium wykonany jest z two-

rzywa o składzie atomowym zbliżonym do tkanki miękkiej z wbudowanym naturalnym szkieletem. Posiada on specjalny fantom płuc o gęstości rzeczywistej tkanki płucnej i przeznaczony jest przede wszystkim do symulowania skażeń płuc.

Plexiglasowy fantom BOMABo-podobny wykonany jest z 25 mm grubości płyt plexi, w których umieszczono szereg gniazd na źródła wzorcowe. Umożliwia to takie rozmieszczenie źródeł wzorcowych w objętości fantomu, że można zasymulować większość narządów wewnętrznych. Swoimi rozmiarami zewnętrznymi odpowiada standardowemu fantomowi BOMAB, lecz ze względu na materiał z którego jest wykonany jego masa jest o ok. 20% większa.

Licznik LPT

Urządzenie to po stosownym wzorcowaniu służy do pomiarów skażeń wewnętrznych tarczycy. W jego skład wchodzi dwa osłonięte detektory scyntylicyjne przeznaczone dla różnych zakresów energii prom. gamma oraz zestaw spektrometryczny. Typowy dziesięciominutowy pomiar zapewnia wykrycie skażenia na poziomie 70 Bq w przypadku ^{125}I i 220 Bq dla ^{131}I .



Rys. 3. Geometria pomiaru tarczycy, fantom Palmera.

IEA dysponuje kilkoma typami fantomów tarczycy. Wszystkie one opierają się w zasadzie o model zaprezentowany przez Palmera i dość powszechnie stosowany (rys. 3). Inne fantomy stosowane w naszym laboratorium pozwalają dodatkowo regulować głębokość położenia tarczycy, co zwiększa dokładność późniejszych pomiarów rutynowych.

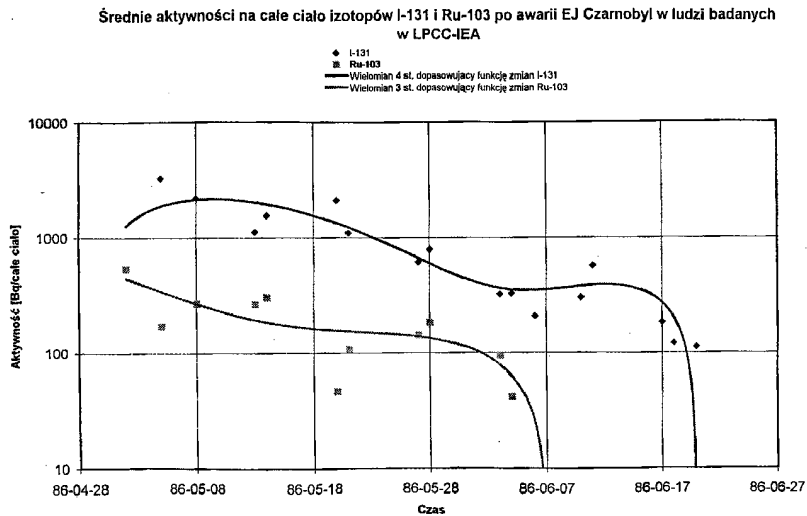
WYNIKI

Pomiary LPCC osób dorosłych po wypadku w Czarnobylu

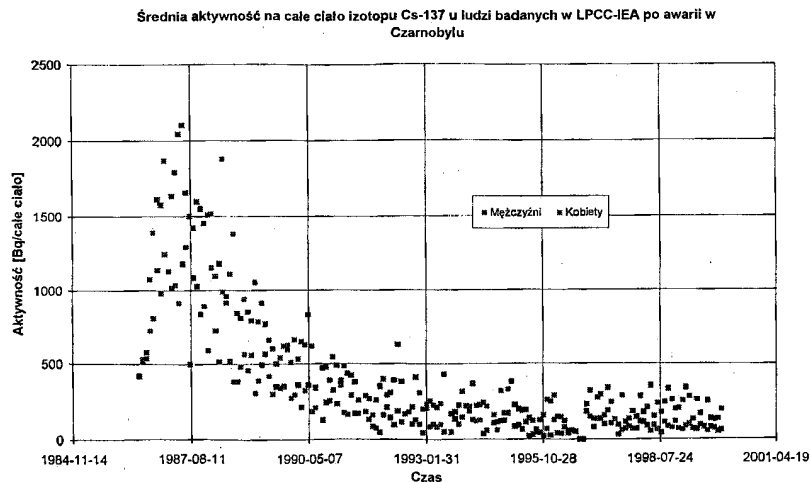
Licznik Promieniowania Ciała Człowieka działa w IEA od roku 1968. Od awarii

czarnobylskiej wykonano nim ponad 5000 pomiarów skażeń wewnętrznych u blisko 850 osób.

W wyniku awarii przedostały się do atmosfery liczne radionuklidy. Najważniejsze z punktu widzenia narażenia ludności to: ^{131}I , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , oraz w mniejszym stopniu ^{103}Ru i inne. Izotop ^{90}Sr nie będzie tu rozpatrywany, ponieważ emituje tylko promieniowanie beta i nie jest wykrywany metodami tu prezentowanymi, a jego udział w dawce całkowitej nie przekroczył kilku procent.



Rys. 4. Średnia aktywność na całe ciało izotopów ^{131}I i ^{103}Ru u ludzi badanych w LPCC-IEA po awarii w Czarnobylu.



Rys. 5. Średnia aktywność na całe ciało izotopu Cs 137 u ludzi badanych w LPCC-IEA po awarii w Czarnobylu.

W początkowym okresie głównym źródłem narażenia były oczywiście izotopy, które zostały uwolnione w dużych ilościach oraz łatwo rozprzestrzeniały się w atmosferze. Wówczas decydowało zagrożenie populacji drogą inhalacyjną.

Efektywny okres połowicznego zaniku izotopów jodu i rutenu nie przekraczał pojedynczych dni. Pomimo krótkiego czasu trwania narażenia i tak udział ^{131}I stanowi ok. 35% całkowitego efektywnego równoważnika dawki obciążającej pochodzącej od wchłonięć z żywnością w latach 1985 – 1996 [9].

Prezentując wyniki pomiarów wykonanych w LPCC (rys. 4 i 5) w IEA należy pamiętać że, 90% osób i blisko 95% pomiarów dotyczy osób zamieszkałych w Warszawie i okolicy. Osoby te, w większości pracownicy OB Świerk, poddawani są systematycznej kontroli skażeń wewnętrznych. Pozostałe osoby pochodzą z różnych regionów, pojedyncze pomiary dotyczą obcokrajowców (obywatele WNP, Egipcjanie) lub Polaków pracujących zagranicą. Pomiary obywateli byłego ZSRR wynikami nie odbiegały od średnich dla populacji polskiej.

Pod koniec czerwca 1986 roku praktycznie przestaliśmy wykrywać w organizmach ludzi izotopy krótkożyciowe. Dominować zaczęły radioizotopy ^{137}Cs i ^{134}Cs . W wyniku opadu przedostały się one do środowiska i łańcucha pokarmowego zwierząt hodowlanych a w konsekwencji skażeniu uległa żywność.

Najwyższy poziom obu izotopów ceszu przypadł na przełom roku 1986/87. W tym okresie notowaliśmy skażenia (mężczyźni) sięgające 5000 Bq/całe ciało przy średniej około 2000 Bq/całe ciało. Ze względu na fakt, że cez po wchłonięciu deponuje się przede wszystkim w tkance mięśniowej oraz z powodu mniejszego udziału masy mięśni, u kobiet notujemy skażenia o kilkanaście do kilkudziesięciu procent niższe od średnich skażeń występujących u mężczyzn.

W roku 1992 praktycznie przestaliśmy obserwować ^{134}Cs natomiast ^{137}Cs jest obserwowalny u większości mierzonych osób do dziś [10].

Ocena narażenia w przypadku incyden-talnym

Jako przykład pomiarów i oceny narażenia osób w przypadkach incydentalnych, przytoczymy jedno ze zdarzeń. Miało ono miejsce w 1999 roku w izotopowej pracowni szpitalnej. W wyniku uszkodzenia pojemnika z kapsułkami izotopu ^{131}I skażeniu uległa pracownia i pracownicy. Cztery osoby (P-1, P-2, P-3, i P-4) w 56 dniu po wchłonięciu, na zlecenie Dozoru Jądrowego, poddano badaniom w IEA. Poniżej prezentujemy wyniki pomiarów oraz metodykę oszacowania efektywnego równoważnika dawki obciążającej na całe ciało i równoważnika dawki obciążającej na tarczę.

Opis zdarzenia

W pracowni izotopowej doszło do zgniecenia pojemnika z 20 kapsułkami izotopu ^{131}I . Nastąpiło skażenie rąk osoby wykonującej prace z izotopami, a następnie skażeniu uległy: klawiatura komputera, stoły, krany, itp. Z wywiadu nie wynikało jak duża liczba kapsułek została zniszczona. Maksymalna aktywność, która mogła ulec uwolnieniu wynosi ok. 80 MBq.

Ustalono, że praca z izotopami, i dekontaminacja dokonywane były niezgodnie z zasadami ochrony radiologicznej. P-1 po awarii usiłował „posprzątać” uszkodzone źródła gołymi rękoma, po czym tymiż rękoma rozprzestrzenił skażenia na terenie pracowni. Wobec powyższego należało przypuszczać, że uległ on skażeniu głównie drogą oddechową a w mniejszym stopniu pokarmową. Pozostali narażeni pracownicy szpitala przebywali w pracowni, ale w sposób świadomy nie mieli bezpośredniego kontaktu z powstałymi na terenie pracowni skażeniami. Nie było pewności, że jedynym źródłem zagrożenia był tylko ^{131}I .

Pomiary aktywności

Licznik Promieniowania Całego Ciała

Wstępnie wszystkie osoby zmierzono za pomocą LPCC w standardowej geometrii krzesła i czasie 20 minut (tab. 2).

Wykluczono obecność w organizmach pacjentów innych izotopów niż ^{131}I , ^{137}Cs i ^{40}K a jednocześnie stwierdzono, że poza P-1 u pozostałych osób nie wykryto obecności radionuklidu ^{131}I .

Tab. 2. Wyniki pomiarów, ocena aktywności oraz dawki dla osób narażonych na skażenie wewnętrzne izotopem I-131.

Pacjent	Pomiary					Ocena aktywności I-131 w tarczycy w dniu wchłonięcia			Dawki	
	LPCC			LPT	Mocz	LPCC	LPT	Mocz	ERDO _{cc} *	RDO _t **
	Cs-137 Bq/kg	K-40 Bq/kg	I-131 Bq/tarcz	I-131 Bq/tarcz	I-131 Bq/l	MBq/tarcz	MBq/tarcz	MBq/tarcz	mSv	mSv
P-1	0,8	77,7	10800	5100	31	19,9#	9,4	10,5	250	830
P-2	0,6	17,1	< 35	< 80	< 2	< 0,13	< 0,3		< 7,5	<25,5
P-3	2,1	47,1	< 35	< 80	< 2	< 0,13	< 0,3		< 7,5	<25,5
P-4	1,2	53,7	< 35	< 80	< 2	< 0,13	< 0,3		< 7,5	<25,5

* Efektywny równoważnik dawki obciążającej na całe ciało

** Równoważniki dawki obciążającej na tarczycę

Pomiar mało wiarygodny

Dla oceny zawartości ^{131}I w tarczycy przeprowadzono kalibrację licznika za pomocą fantomu człowieka standardowego (170 cm, 70 kg) typu BOMAB-PLEXI w szyi którego umieszczono fantom tarczycy o aktywności 6,64 kBq i objętości 10 cm³. Dla oceny innych izotopów stosowano standardowe kalibracje fantomem wodnym typu BOMAB.

Izotop ^{40}K jest naturalnym nuklidem promieniotwórczym. Izotop ^{137}Cs pochodzi ze skażenia środowiska powstałego w wyniku awarii EJ Czarnobyl oraz wcześniejszych prób jądrowych. Wykryta aktywność obu izotopów jest typowa dla populacji polskiej i zależy głównie od diety i kondycji fizycznej. Minimalna aktywność jaką można wykryć za pomocą LPCC w standardowym pomiarze wynosi: 0,5 Bq/kg (^{137}Cs), 0,7 Bq/kg (^{40}K) oraz w przypadku ^{131}I - ok. 35 Bq/tarczycę lub 0,5 Bq/kg masy ciała w czasie pierwszych kilku godzin po wchłonięciu.

Pomiary w LPCC stanowią jedynie pierwszy etap w ocenie narażenia. Wynika to z bardzo dużej niepewności oceny aktywności ^{131}I . Dlatego wszystkie osoby skierowano na badania w LPT.

Licznik Promieniowania Tarczycy (LPT)

LPT, dla ^{131}I , pozwala za pomocą jednego pomiaru, ocenić aktywność w niej zdeponowaną oraz średnią głębokość na jakiej leży tarczyca. Próg czułości zależy od głębokości położenia tarczycy. Kalibrację prowadzono w wodnym fantomie szyjnym

człowieka standardowego, izotopem ^{131}I . Uzyskano następujące wyniki pomiarów aktywności ^{131}I zawartej w tarczycy badanych osób: P-1 - 5,1 kBq, P-2 - ≤ 80 Bq, P-3 - ≤ 80 Bq, P-4 - ≤ 80 Bq.

Pomiar aktywności dobowej zbiórki moczu

Pomiaru moczu dokonano jedynie dla P-1 bowiem w wyniku poprzednich pomiarów jedynie tu można było spodziewać się obecności ^{131}I . Do pomiaru użyto 150 ml próbki z dobowej zbiórki moczu. Zastosowano rutynową procedurę [11] dla pomiaru próbek środowiskowych, gdzie do kalibracji stosuje się roztwory wodne. W pomiarze, dla którego próg wykrywalności dla ^{131}I wynosi 2 Bq/l, zmierzono 31 Bq/l.

Ocena jakości i przydatności wyników pomiarów do szacowania dawek

Pomiar w LPCC wykonywany w momencie, gdy ^{131}I zgromadzony jest prawie wyłącznie w tarczycy pacjenta należy traktować jako ocenę wstępną. Rzeczywista geometria pomiarowa dla P-1 (186 cm, 94 kg) tak dalece odbiega od modelu kalibracyjnego (170 cm, 70 kg), że znaczny błąd w ocenie ilościowej aktywności jest usprawiedliwiony. Ponieważ jest to jednak najczulsza ze stosowanych technik pomiarowych warto było jej użyć dla oceny minimalnych wchłoniętych aktywności oraz oznaczenia ewentualnie innych radionuklidów, z którym pracownicy ci także stykają się w swojej pracy.

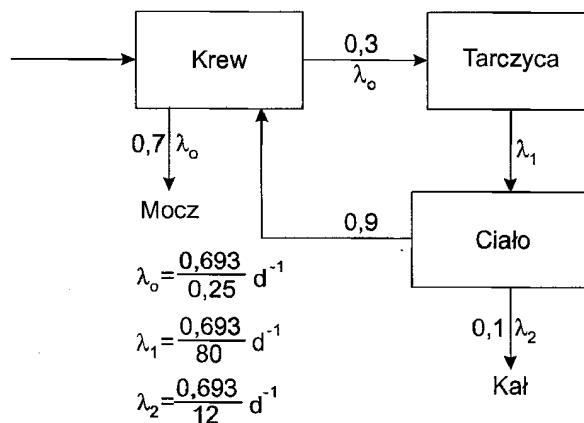
Decydujące znaczenie dla oceny aktywności jodu w tarczycy miał pomiar dokonany w LPT. Błąd oceny aktywności w tarczycy silnie zależy od dwóch czynników: efektywnej głębokości położenia tarczycy i jakości zebranego widma. Ma to znaczenie zwłaszcza przy ocenie aktywności zbliżonych do progu czułości. Przy widmach dobrze określonych, gdzie błąd statystyczny pola pod pikiem całkowitej absorpcji dla energii 364 keV jest mniejszy niż 1%, dokładność określenia aktywności jest lepsza niż 10%.

W przypadku P-1 widmo zebrane jest z błędem statystycznym mniejszym niż 0,5% dla pików 364 keV. Dodatkowy pomiar próbki moczu na zestawie do pomiaru próbek środowiskowych ma na celu potwierdzenie poprawności innych pomiarów. Wynik tego pomiaru obarczony jest błędem 15%.

Ocena wnikiętej aktywności

Do oceny narażenia niezbędna jest znajomość metabolizmu danego izotopu w organizmie. Dla potrzeb tego opracowania posługiwano się modelem oddechowym prezentowanym w ICRP-54. Zgodnie z modelem (rys. 6) po jednostkowym wnikięciu – 30% radionuklidu deponuje się w tarczycy, a pozostałe 70% wydalają z moczem. Jod zawarty w tarczycy zostaje wymieniany z biologicznym okresem półtrwania 80 dni i jest uwalniany z płatów tarczycy w formie organicznych związków jodu (jodek metylu). Przyjmuje się, że organiczne związki jodu są niejednolicie rozmieszczane między wszystkie organy i tkanki ciała i usuwane z biologicznym okresem półtrwania około 12 dni – 10% tych organicznych związków jest bezpośrednio wydalane z kałem, a reszta wraca do układu jako nieorganiczne związki jodu.

Ażeby można było ocenić dawki na całe ciało i tarczycę należy w pierwszej kolejności określić jaką aktywność wnikięła do organizmu oraz jaką drogą i w jakim czasie. Dla oceny ilości wnikiętego izotopu wykorzystano modele stosowane w ICRP-23 [12], ICRP-30 i ICRP-54 przy narażeniu drogą oddechową. Do szacowania wnikięcia przyjmujemy wyniki pomiarów tarczycy w LPT i moczu.



Rys. 8. Model zachowania się ^{131}I w organizmie człowieka po wchłonięciu drogą oddechową ICRP-54.

W przypadku P-1 jakość otrzymanego widma była na tyle dobra, że pomimo upływu 56 dni od awarii pozwoliła ocenić głębokość położenia tarczycy oraz określić aktywność zdeponowanego w niej jodu. Aktywność ta w dniu pomiaru wynosiła 5,1 kBq, co pozwala oszacować początkowe wnikięcie. Na podstawie krzywych retencji ^{131}I w tarczycy zamieszczonych w ICRP-54 obliczono, że w dniu następnym po wnikięciu w tarczycy pacjenta znajdowało się 2,8 MBq. Zgodnie z modelem biokinetyki jodu w organizmie ludzkim po jednostkowym wchłonięciu 30% radionuklidu zostaje zdeponowane w tarczycy a pozostałe 70% wydalają się z moczem - co oznacza, że pacjent w dniu awarii wchłoniął aktywność rzędu 9,4 MBq.

Dodatkowy pomiar aktywności 150 ml próbki z dobowej zbiórki moczu wykonano celem weryfikacji pomiaru za pomocą LPT oraz potwierdzenia poprawności przyjętego modelu wchłonięcia. Próbkę zbierano w 55 dobie po wypadku, pomiaru dokonano w 57 dobie. W wyniku czego otrzymaliśmy aktywność moczu 31 Bq/l. Wykorzystując dane zawarte w raporcie ICRP-23 oraz korygując aktywność na dzień poboru próbki otrzymano, że w 55 dobie po wypadku pacjent wydalil z moczem 52 Bq. Wykorzystując ponownie krzywe wydalania izotopu ^{131}I z moczem (ICRP-54) oceniono, że wnikięło ok. 10,5 MBq.

Można z całą pewnością założyć, że w wyniku awarii w dniu wnikięcia P1 wchłoniął jednorazowo ok. 10 MBq izotopu ^{131}I , z którego 3 MBq zdeponowało się w tarczycy.

U pozostałych osób nie wykryto obecności izotopu ^{131}I ani w pomiarach aktywności tarczycy w LPT, ani w LPCC. Dla tych osób można przyjąć, że mogły one co najwyżej wchłonać taką ilość izotopu ^{131}I , który w dniu pomiaru ich tarczycy miał aktywność niższą od progu detekcji Licznika Promieniowania Ciała Człowieka w IEA. Próg ten wynosi ok. 35 Bq. Można zatem posługując się ICRP-54 twierdzić, że maksymalna wchłonięta aktywność, która wniknęła jest nie większa niż 0,13 MBq.

Oszacowanie narażenia wewnętrznego

Narażenie wewnętrzne od wniknięcia jodu do organizmu człowieka można ocenić na podstawie dwóch wielkości:

- równoważnika dawki obciążającej dla tarczycy ($H_{T,50}$),
- efektywnego równoważnika dawki obciążającej (H_{EF50}).

Zakładając, że wniknięcie jodu nastąpiło jedynie drogą oddechową i uwzględniając dane podane w Zarządzeniu Prezesa PAA [13] o dawkach granicznych możemy przyjąć jako podstawę do obliczeń, zależności podane poniżej. Wartości zmierzone powyżej czułości metod pomiarowych dotyczyły P-1, stąd ocena narażenia wewnętrznego. Równoważnik dawki obciążającej dla tarczycy P-1 można wyrazić jako:

$$H_{T,50} = I_O \times L_T \times (1/ALI_{O,T}) = 0,83 \text{ [Sv]}$$

gdzie:

I_O - wniknięcie ^{131}I – 10^7 Bq,

L_T – roczna dawka graniczna dla tarczycy – 0,5 Sv,

$ALI_{O,T}$ – roczny limit wniknięcia dla tarczycy drogą oddechową – 6×10^6 Bq,

Efektywny równoważnik dawki obciążającej P-1 można określić z następującej zależności:

$$H_{EF50} = I_O \times L_{CO} \times (1/ALI_{O,CO}) = 0,25 \text{ [Sv]}$$

gdzie:

I_O - wniknięcie ^{131}I – 10^7 Bq,

L_{CO} – roczna dawka graniczna dla całego organizmu – 0,05 Sv

$ALI_{O,CO}$ – roczny limit wniknięcia dla całego organizmu drogą oddechową 2×10^6 Bq.

DYSKUSJA I WNIOSKI

Dyskusja błędów i analiza niepewności stosowanej metody

Statystyczne błędy pomiaru były niewielkie i nie przekraczały 10 %.

Niepewność określenia narażenia wewnętrznego wynika z następujących czynników:

- opóźnienia pomiarów w stosunku do momentu zaistnienia zdarzenia (56 dni),
- braku informacji o drogach wniknięcia izotopu ^{131}I do organizmu (oddechowa, pokarmowa, poprzez skórę, czy mieszana),
- braku danych o zgodności retencji i wydzielania ^{131}I u badanych osób z krzywymi określonymi w publikacjach ICRP dla człowieka standardowego. Analizując wpływ ww. czynników na wynik końcowy oceny narażenia, należy stwierdzić, że dla:
 - **P-1** – niepewność oceny nie powinna przekraczać czynnika 2. Istniałaby możliwość polepszenia pewności tej oceny jeśli można byłoby powtórzyć pomiary za miesiąc i dwa miesiące oraz dokonać szczegółowej analizy wyników monitoringu po wykryciu zdarzenia.
 - **P-2, P-3, i P-4** – wobec długiego okresu opóźnienia pomiaru w stosunku do zaistniałego zdarzenia (56 dni) niepewność oceny dawki wynikająca z czułości metody pomiaru przekracza rząd wielkości. Czy należy na tej podstawie oceniać wartość równoważnika dawki obciążającej dla tarczycy tych osób? Jest to kwestia decyzji, która winna wynikać z analizy wyników monitoringu pomieszczenia i skażeń osobistych tych osób, wykonanego bezpośrednio po zdarzeniu. Autorzy nie posiadali protokołu z pomiarów operacyjnych, a informacje uzyskane z wywiadu raczej nie wskazywały na możliwość zaistnienia znaczącego wniknięcia radionuklidu ^{131}I do organizmu tych osób (rzędu 130 kBq co odpowiadałoby efektywnemu równoważnikowi dawki obciążającej 3,25 mSv).

Wobec powyższego nasuwa się jednoznaczny wniosek o konieczności prowa-

dzenia pomiarów skażeń bezpośrednio po ich zaistnieniu. Bardzo celowe jest także kilkukrotne ich powtarzanie w odstępach nie większych od $2T_{EF}$, tak aby możliwe było porównanie krzywej retencji poszczególnego pacjenta z modelem ICRP, który stosuje się do szacowania efektywnego równoważnika dawki obciążającej.

LITERATURA

1. Lakey J R A. Review of Past Accidents, Proceedings Training Course on OFF-SITE EMERGENCY PLANING AND RESPONSE FOR NUCLEAR ACCIDENTS SCR/CEN; Mol, Belgium; 1991.
2. Królicki L. Medycyna nuklearna. Fundacja im. L. Rydygiera, Warszawa 1996.
3. ICRP Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, Publication 1980; 30.
4. ICRP Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers: Design and Interpretation. Publication 29.
5. ICRP Age – dependent Doses of Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part I. Publication 20.
6. ICRP Age – dependent Doses of Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part II. Publication 23.
7. ICRP Age – dependent Doses of Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part III. Publication 25.
8. ICRP Age – dependent Doses of Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part IV. Publication 25.
9. Grabowski D, Kurowski W, Muszyński W, Rubel B, Smagała G, Świętochowska J, et al. Wilgos J. Skażenia promieniotwórcze środowiska i żywności w Polsce w 1996 roku. Raport CLOR nr 131/D.
10. Filiplak B, Geisler J, Major Z, Pliszczyński T. Skażenia wewnętrzne pracowników Ośrodka Jądrowego w Świerku. Raport wew.; 1992.
11. Pliszczyński T. Metodyka pomiarów spektrometrycznych w SOR-IEA instr. wew.; 1995.
12. ICRP Raport of the Task Group on Reference Man. Publication 1975; 23.
13. Zarządzenie Prezesa PAA z dnia 31.03.1988 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego i wskaźników pochodnych określających zagrożenie promieniowaniem jonizującym. M.P. 1988; 14; poz. 124.