Pol J Med Phys Eng 2011;17(4):163-171.
PL ISSN 1425-4689
doi: 10.2478/v10013-011-0017-0
website: http://www.pjmpe.waw.pl

Tomasz Pliszczyński, Jakub Ośko, Katarzyna Ciszewska,
Zbigniew Haratym, Marianna Umaniec, Renata Sosnowiec

Ocena narażenia wewnętrznego za pomocą licznika promieniowania ciała człowieka

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, A. Sołtana 7, 05-400 Otwock, Polska

Proces oceny narażenia wewnętrznego na skażenia substancjami promieniotwórczymi jest skomplikowany i towarzyszy mu wiele czynników, które są źródłem niepewności szacowania obciążającej dawki efektywnej. W niniejszym artykule przedstawiono sposób właściwego postępowania podczas szacowania obciążającej dawki efektywnej za pomocą Licznika Promieniowania Ciała Człowieka.

Słowa kluczowe: pomiary skażeń wewnętrznych, licznik promieniowania ciała człowieka

Wstęp

Ocena narażenia wewnętrznego (dawki obciążającej) nie jest możliwa na drodze bezpośredniego pomiaru tak jak to ma miejsce w przypadku narażenia zewnętrznego. Aby ocenić narażenie wewnętrzne u konkretnej osoby niezbędna jest znajomość: aktywności materiału promieniotwórczego zdeponowanego w organizmie, scenariusza narażenia (droga wniknięcia, czas wniknięcia, forma chemiczna). Ostatnim elementem niezbędnym do oszacowania narażenia jest konwersja aktywności wnikniętej na dawkę obciążającą. Wynik oszacowania dawki będzie tym lepszy im lepiej zostaną określone wszystkie dane wejściowe.

Współczynniki konwersji aktywności wnikniętej na dawkę obciążającą dla poszczególnych izotopów oraz dróg narażenia można znaleźć w przepisach prawnych

[8]. Są one wynikiem wieloletnich prac specjalistów z dziedziny OR wielu krajów. Publikowane są w kolejnych wydawnictwach ICRP w formie zaleceń [1, 2].

Scenariusz narażenia, w normalnych warunkach pracy, jest na ogół znany, ponieważ wszelkie prace wykonywane z materiałami promieniotwórczymi są realizowane zgodnie z wcześniej opracowanymi procedurami. Nieznajomość scenariusza narażenia występuje zwykle jedynie w przypadkach awarii lub innych zdarzeń radiacyjnych i dotyczy osób, nie narażonych zawodowo na promieniowanie jonizujące.

Jedyną, uzyskiwaną na drodze pomiaru, daną wejściową do procesu szacowania dawki jest wartość aktywności wchłoniętej w wyniku narażenia. Aby ocenić aktywność wniknięta do organizmu stosujemy jedną z dwóch metod:

– pomiar bezpośredni metodami *in vivo*, który pozwala zmierzyć promieniowanie gamma wychodzące poza ciało pacjenta,
– pomiar pośredni poprzez preparatykę i pomiar wydalin (*in vitro*), stosowany dla przypadków skażeń izotopami alfa, beta i gamma-promieniotwórczymi.

Przedmiotem tej publikacji są pomiary bezpośrednie realizowane za pomocą urządzenia zwanego Licznikiem Promieniowania Ciała Człowieka (LPCC). LPCC, zgodnie z PN 61582 dzielą się na cztery typy [7]. Najbardziej zaawansowane są liczniki typu 1. Są to urządzenia do pomiarów aktywności na bardzo niskim poziomie, instalowane głównie w instytucjach badawczych, elektrowniach atomowych, laboratoriach w centrach awaryjnych, uczelniach lub szpitalach klinicznych do celów badawczych. Zestawy detekcyjne i mechanizmy napędowe do przesuwu detektorów montowane są w specjalnych kabinach osłonnych. Na całkowite wyposażenie licznika składa się zestaw zawierający urządzenia do przetwarzania, analizy, archiwizacji oraz wizualizacji danych pomiarowych.

Zgodnie z prawem szacowanie obciążającej dawki równoważnej od narażenia wewnętrznego może wykonać jedynie laboratorium akredytowane. Jedynym laboratorium tego typu w Polsce jest Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych w Narodowym Centrum Badań Jądrowych.

Konstrukcja, wyposażenie, aparatura

Konieczność monitoringu personelu istniała od początku funkcjonowania ośrodka jądrowego w Świerku. Obecna konstrukcja kabiny osłonnej LPCC powstała w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Jest to labiryntowa kabina z osłoną wykonaną z 200 mm żelaza, 5 mm ołowiu, 1 mm kadmu i 0,5 mm miedzi (licząc od zewnątrz). Wewnątrz kabiny umieszczona jest leżanka, która umożliwia pomiar w geometrii: krzesła i łóżka oraz pomiar scanningowy.

Jako detektor wykorzystywany jest detektor germanowy wysokiej czystości (typu GX4018) o energetycznej zdolności rozdzielczej około 1,8 keV dla energii 1,33 MeV izotopu Co-60 i względnej wydajności 40%. Detektor jest umieszczony statycznie nad leżanką z pacjentem. Drugim detektorem jest scyntylator NaI(Tl) o objętości 6000 cm^3 umieszczony na ruchomym wózku pod leżanką pacjenta, który umożliwia lokalizację przestrzenną izotopu w ciele pacjenta.

W skład wyposażenia LPCC wchodzą fantomy człekopodobne niezbędne do wzorcowania licznika. Laboratorium dysponuje dwoma kompletami fantomów butelkowych (typu BOMAB i butle laboratoryjne) z których można tworzyć odpowiednie sylwetki, począwszy od osobnika niskiego szczupłego, aż do wysokiego tęgiego (rysunek 1, 2). Dla celów kalibracji fantomy te wypełnia się wieloizotopowymi roztworami wzorcowymi.

Rysunek 1. Fantom typu BOMAB (sylwetka standardowa) w geometrii krzesło w kabinie osłonnej LPCC.

Rysunek 2. Fantom butelkowy (sylwetka standardowa) w geometrii krzesło w kabinie osłonnej LPCC. [6]

Kalibracja

Pomiar za pomocą LPCC jest pomiarem porównawczym. We wszystkich pomiarach promieniowania bardzo istotna jest geometria pomiarowa, czyli wzajemne położenie źródła promieniowania i detektora. Wynik pomiaru za pomocą LPCC zależy od wzrostu i masy pacjenta. Wiąże się to ze stosowaniem wielu kalibracji urządzenia pomiarowego tak, aby przy założonym dopuszczalnym przedziale błędu, wyniki pomiarów rzeczywistych pacjentów mieściły się w tych granicach.

W praktyce bardziej istotna jest czułość metody pomiaru, a nie jej precyzja. Wynika to z filozofii stosowanej w ochronie radiologicznej, gdzie z punktu widzenia jakości monitoringu personelu większe znaczenie ma wykrycie skażenia wewnętrznego skutkującego dawką na poziomie 0,1% dawki granicznej z niepewnością 50% niż wykrycie skażenia powodującego dawkę o wartości 50% dawki granicznej z niepewnością 0,1%.

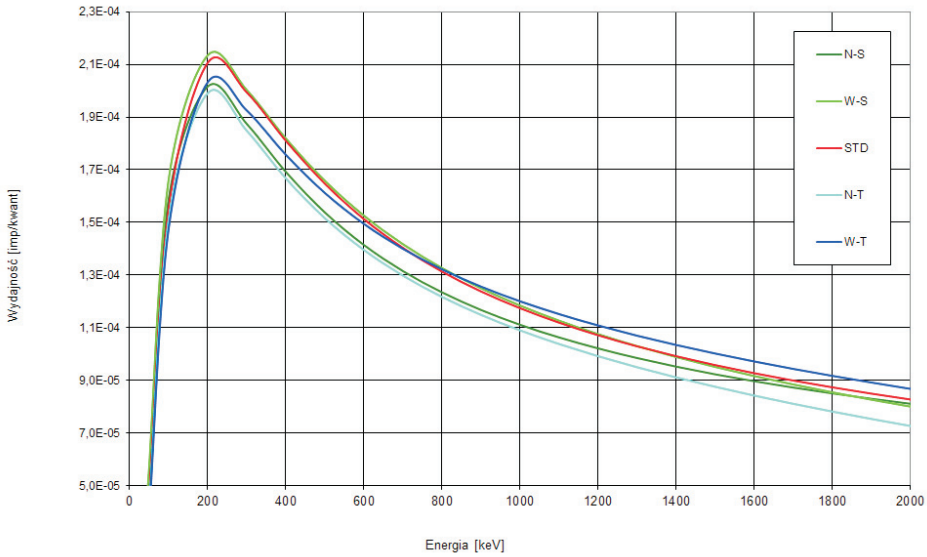
Przy wzorcowaniu LPCC dla celów monitoringu personelu stosuje się szereg założeń upraszczających, z których najważniejsze jest przyjęcie homogenicznego rozkładu materiału radioaktywnego w ciele pacjenta. W rzeczywistości tylko nieliczne izotopy rozkładają się w miarę równomiernie w całym ciele.

Kalibracje LPCC wykonuje się za pomocą kilku fantomów symulujących różne sylwetki. Zwykle są to: sylwetka standardowa (170 cm/70 kg), człowieka wysokiego szczupłego (186 cm/64 kg), wysokiego tęgiego (185 cm/93 kg), niskiego tęgiego (153 cm/76 kg) oraz niskiego szczupłego (152 cm/51 kg). Kształt sylwetki określa się za pomocą indeksu kształtu ω:

$$\omega = \sqrt{\frac{m}{h}} \tag{1}$$

gdzie: m — masa w kg, h — wzrost w cm.

Na rysunku 3 zaprezentowano wyniki kalibracji wykonanej dla pięciu sylwetek za pomocą fantomu butelkowego wypełnionego wzorcowym roztworem radioaktywnym zawierającym Am-241, Cd-109, Co-57, Cr-51, Sn-113, Sr-85, Cs-137, Mn-54, Zn-65, Co-60 i Y-88. Zakres energii promieniowania gamma tych izotopów zawiera się w przedziale od 60 do 1830 keV. Wyznaczone wartości wydajności dla różnych sylwetek różnią się pomiędzy sobą od 8 do 40%. Największe różnice dotyczą niskich energii.



Rysunek 3. Wydajność zestawu pomiarowego LPCC dla pięciu sylwetek (standardowej -SD, wysokiej szczupłej W-S, wysokiej tęgiej W-T, niskiej szczupłej N-S i niskiej tęgiej N-T.

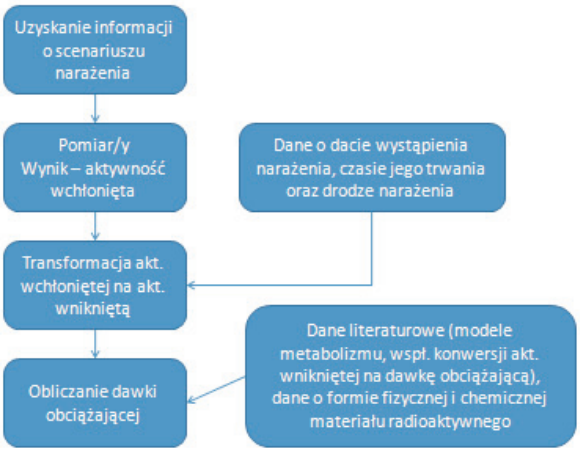
Sposób oceny dawki

Ocena dawki obciążającej na podstawie pomiaru w LPCC jest dość skomplikowanym procesem. Sposób postępowania przedstawiono na rysunku 4.

Podstawową informacją, niezbędną dla szacowania dawki jest znajomość scenariusza narażenia. Nieprecyzyjne określenie czasu skażenia wnosi największy udział w niepewność oszacowania dawki obciążającej, wielokrotnie większą niż niepewność pomiaru aktywności zdeponowanej w ciele pacjenta. W przypadku rutynowych czynności scenariusz narażenia jest dość dobrze znany. Pracownik wykonuje czynności opisane w instrukcji pracy, znana jest postać fizyczna i chemiczna, w jakiej występuje izotop promieniotwórczy oraz droga narażenia. W sytuacjach awaryjnych dla pracowników zawodowo narażonych na promieniowanie scenariusz narażenia można dość łatwo opisać. Dla pacjentów spoza grup osób zawodowo narażonych, scenariusz narażenia jest zwykle trudny do zdefiniowania.

Następnym krokiem przy szacowaniu dawki obciążającej jest pomiar aktywności radionuklidów obecnych w ciele pacjenta w momencie wykonywania pomiaru.

Kolejny krok polega na przejściu od aktywności zmierzonej (wchłoniętej) do aktywności wnikniętej — to pojęcie mówi nam ile materiału promieniotwórczego dostało się do naszego organizmu w czasie trwania narażenia.



Rysunek 4. Algorytm postępowania przy ocenie dawki obciążającej.

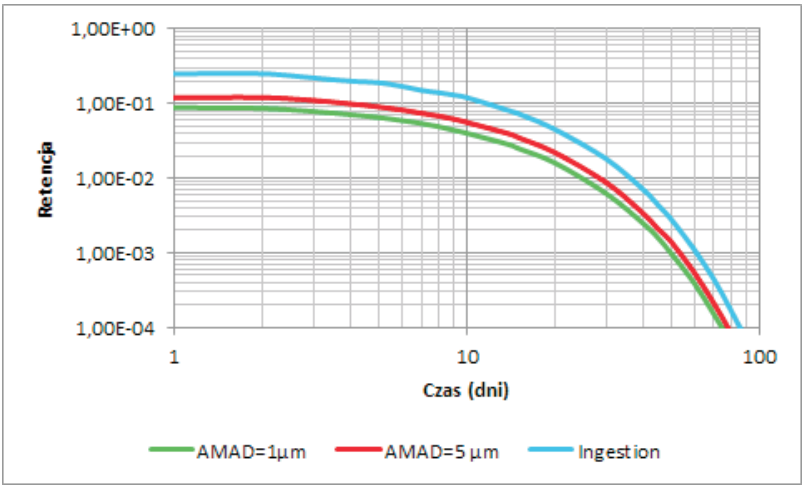
Ostatnim etapem jest wyznaczenie wartości liczbowej dawki obciążającej poprzez pomnożenie wyznaczonej wartości aktywności wnikniętej przez odpowiedni dla danego scenariusza narażenia współczynnik konwersji, będący wielkością tabelaryczną.

Przykład szacowania dawki obciążającej

Sposób szacowania dawki obciążającej zostanie zaprezentowany poniżej, na przykładzie skażenia jodem I-131 podczas przeładunku z pojemników transportowych, na skutek rozszczelnienia kapsuły z preparatem. Prace przeładunkowe trwały około pół godziny. Narażenie pochodziło od jodu zawartego w powietrzu. Pomiar pacjenta wykonano w 8 dni po zdarzeniu.

Scenariusz narażenia znany jest dość dokładnie. Doprecyzowania w wywiadzie z pacjentem lub IOR-em odpowiedzialnym za ochronę radiologiczną wymaga tylko dokładny czas zdarzenia oraz forma chemiczna i tzw. średnia średnica aerodynamiczna cząstek aerozolu tzw. AMAD.

W wyniku wykonanego pomiaru w ósmym dniu po zdarzeniu otrzymano wartość aktywności wchłoniętej 12,500 ± 1 kBq. Aktywność wchłoniętą transformujemy na wartość aktywności wnikniętej korzystając z funkcji retencji dostępnych np. w Raporcie ICRP 78 [1], lub normie ISO 27048 [3] (rysunek 5). Przyjmując standardowe warunki



Rysunek 5. Funkcja retencji dla izotopu I-131 — narażenie drogą oddechową dla dwóch wielkości AMAD oraz dla narażenia drogą pokarmową.

tzn. AMAD = 5 μm, widzimy że po 8 dniach od wystąpienia skażenia aktywność wchłonięta stanowi jedynie 6,8% rzeczywiście wniknięte aktywności. Aktywność wniknięta wyniosła 184,0 ± 14,7 kBq. Współczynnik konwersji, zgodnie z przyjętym scenariuszem narażenia, wynosi 1,1 10^{-8}, więc dawka obciążająca jest równa 2,02 mSv.

Gdyby przyjąć, że 30% aktywności przedostało się do organizmu drogą pokarmową, dawka obciążająca wyniesie 1,71 mSv.

Wnioski

Oszacowanie dawki obciążającej pochodzącej od skażeń wewnętrznych jest obarczone znaczną niepewnością. Jej głównym źródłem jest nieznajomość scenariusza skażenia i wynikający z niego niewłaściwy dobór modelu metabolizmu. W przypadkach, kiedy scenariusz jest znany jedynie w przybliżeniu szacowanie dawki będzie obarczone bardzo dużą niepewnością sięgającą nawet trzykrotnej wartości oszacowanej dawki.

Źródłem niepewności oszacowania dawki jest również niepewność pomiaru aktywności metodami *in vivo*. Sam pomiar, przy obecnie stosowanych technikach, jest bardzo dokładny, ale źródłem niepewności mogą być zmiany geometrii pomiarowej, wynikające z różnic w budowie anatomicznej pacjenta. Metodą, która pozwala zmniejszyć tego rodzaju niepewność jest wykonanie odpowiedniej kalibracji wydajnościowej, za pomocą różnych fantomów całego ciała (jak przedstawiono w niniejszym artykule). Podobne metody stosuje się również podczas innych tego typu pomiarów, np. pomiarów skażeń tarczycy jodem promieniotwórczym za pomocą licznika promieniowania tarczycy. Kalibrację licznika można wykonać za pomocą fantomów pozwalających na symulowanie różnego położenia tarczycy w szyi człowieka [4, 5].

Literatura

[1] ICRP Publication 78, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers, Ann. ICRP 27(3-4), 1997.

[2] ICRP Publication 54, Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers: Design and Interpretation, Ann. ICRP 19(1-3), 1989.

[3] ISO 27048:2011 Radiation protection — Dose assessment for the monitoring of workers for internal radiation exposure, 2011.

[4] Ośko J., Golnik N., Pliszczyński T. Spectrometric measurements of iodine and technetium activity in thyroid, NUCL INSTRUM METH A, 580 (578-581), 2007.
[5] Ośko J., Golnik N., Pliszczyński T. Uncertainties in determination of 131I activity in thyroid gland, Radiation Protection Dosimetry (2007), Radiat. Prot. Dosim. 125 (516-519), 2007.
[6] Ośko J., Pliszczyński T., Umaniec H., Sosnowiec R. Przygotowanie do kalibracji licznika promieniowania całego ciała z nowym detektorem — modelowanie sylwetek człowieka za pomocą fantomu butelkowego, IEA Raport B — 73/2010.
[7] PN-EN 61582:2009 Urządzenia ochrony przed promieniowaniem — Liczniki in vivo — Klasyfikacja, wymagania ogólne i procedury badań urządzeń przenośnych, przewoźnych i stacjonarnych, 2009.
[8] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (tekst jednolity Dz. U. z 2007 r., Nr 42., poz. 276 z późn.zm.).

Estimation of internal radiation exposure using a whole body counter

Key words: measurements of internal contamination, whole body counter.