

Marcin Brodecki
Joanna Domienik
Marek Zmysłony

SYSTEM WIELKOŚCI DOZYMTRYCZNYCH DO OCENY POZIOMU DAWEK OTRZYMYWANYCH PRZEZ PERSONEL ZAWODOWO NARAŻONY NA ZEWNĘTRZNE ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO

DOSIMETRIC SYSTEM FOR ASSESSING DOSES RECEIVED BY PEOPLE
OCCUPATIONALLY EXPOSED TO EXTERNAL SOURCES OF IONIZING RADIATION

Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland
Zakład Ochrony Radiologicznej / Department of Radiation Protection

STRESZCZENIE

Obecny system wielkości dozymetrycznych określony został przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP) i Międzynarodową Komisję ds. Jednostek Promieniowania i Pomiarów (International Commission on Radiation Units and Measurements – ICRU). Złożoność systemu implikuje zarówno fizyczna natura promieniowania jonizującego, wynikająca z występowania różnych jego typów o różnej zdolności jonizacji ośrodka, jak i osobnicza radiowrażliwość eksponowanego materiału biologicznego. W ochronie radiacyjnej i szacowaniu radiacyjnego narażenia zawodowego według najnowszych zaleceń można wyróżnić 3 typy wielkości dozymetrycznych – wielkości podstawowe, ochronne i operacyjne. Limity dawek dla osób zawodowo narażonych odnoszą się bezpośrednio do dozymetrycznych wielkości ochronnych, tj. dawki równoważnej i dawki efektywnej, podczas gdy wielkości te są praktycznie niemierzalne w realnych warunkach pomiarowych. Z tego powodu w systemie wielkości dozymetrycznych zdefiniowano mierzalne bezpośrednio tzw. wielkości operacyjne, które stanowią równoważniki dla wielkości ochronnych. Umożliwią one wiarygodną ocenę dawki równoważnej i efektywnej poprzez prowadzenie rutynowego monitoringu radiacyjnego osób zawodowo narażonych w oparciu o podstawowe wielkości dozymetryczne. W pracy przedstawiono charakterystykę wspomnianych wielkości, ich wzajemne relacje oraz znaczenie w ocenie poszczególnych skutków popromiennych. Zaprezentowano również metody ich implementacji w dozymetrii indywidualnej i środowiskowej osób zawodowo narażonych. Materiał zawarty w artykule jest podsumowaniem najistotniejszych informacji o wielkościach dozymetrycznych oraz odniesieniem ich do współczesnych wymogów prawnych, w tym projektowanej zmiany rocznego limitu dla zawodowej ekspozycji soczewek oczu. Materiał adresowany jest zwłaszcza do osób odpowiedzialnych za kontrolę dozymetryczną w zakładach pracy, inspektorów ochrony radiologicznej i lekarzy medycyny pracy. Med. Pr. 2012;63(5):607–617

Słowa kluczowe: wielkości dozymetryczne, ocena dawek promieniowania, ekspozycja zawodowa

ABSTRACT

The current system of dosimetric quantities has been defined by the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Complexity of the system implies the physical nature of ionizing radiation, resulting from the presence of different types of radiation of different ionization capabilities, as well as the individual radiation sensitivity of biological material exposed. According to the latest recommendations, there are three types of dosimeter quantities relevant to radiation protection and radiological assessment of occupational exposure. These are the basic quantities, safety quantities and operational quantities. Dose limits for occupational exposure relate directly to the protection quantities, i.e. the equivalent dose and effective dose, while these quantities are practically unmeasurable in real measurement conditions. For this reason, in the system of dosimetric quantities directly measurable operating volumes were defined. They represent equivalents of the protection quantities that allow for a reliable assessment of equivalent and effective dose by conducting routine monitoring of occupational exposure. This paper presents the characteristics of these quantities, their relationships and importance in assessing individual effects of radiation. Also the methods for their implementation in personal and environmental dosimetry were showcased. The material contained in the article is a compendium of essential information about dosimetric quantities with reference to the contemporary requirements of the law, including the changed annual occupational exposure limit for the lens of the eye. The material is especially addressed to those responsible for dosimetry monitoring in the workplace, radiation protection inspectors and occupational health physicians. Med Pr 2012;63(5):607–617

Key words: dosimetric quantities, radiation dose assessment, occupational exposure

Adres autorów: Zakład Ochrony Radiologicznej, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera,
św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: marbrod@imp.lodz.pl
Nadesłano: 10 września 2012, zatwierdzono: 19 września 2012

WPROWADZENIE

Minimalizacja ryzyka radiacyjnego dla osób zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące jest jednym z głównych zadań organizacji takich jak Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP), Międzynarodowa Komisja ds. Jednostek Promieniowania i Pomiarów (International Commission on Radiation Units and Measurements – ICRU) czy Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (International Atomic Energy Agency – IAEA). Wydawane przez nie dokumenty i publikacje oparte są na 3 zasadach ochrony radiologicznej, których przestrzeganie znacznie ogranicza prawdopodobieństwo wystąpienia skutków popromiennych.

Obok każdorazowego uzasadnienia ekspozycji na promieniowanie, oraz konieczności optymalizacji działań zgodnie z zasadą racjonalnej minimalizacji narażenia (As Low As Reasonably Achievable – ALARA), ograniczenie ryzyka radiacyjnego związane jest z wprowadzeniem limitów dawek dla osób zawodowo narażonych. Limity wyrażone są w tzw. wielkościach ochronnych (dawka równoważna i efektywna), powstałych na bazie podstawowych wielkości dozymetrycznych (dawka pochłonięta, kerma w powietrzu i fluencja). Ocena tych wielkości jest jednak bardzo trudna (bazuje na symulacjach komputerowych i badaniach z wykorzystaniem antropomorficznych modeli człowieka), a jej prowadzenie w realnych warunkach narażenia zawodowego – niemożliwe. Wiązałoby się to bowiem z koniecznością pomiaru dawek w poszczególnych narządach i tkankach zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz ciała osoby ekspozowanej.

Do systemu wielkości dozymetrycznych opisujących narażenie zawodowe ze strony zewnętrznych źródeł promieniowania włączono więc tzw. wielkości operacyjne, które stanowią równoważniki wspomnianych wielkości ochronnych. Równoważniki dawek pozwalają na ocenę wielkości ochronnych poprzez pomiar bezpośredni i zastosowanie rutynowych metod dozymetrii indywidualnej i środowiskowej. Mimo że niekoniecznie dają te same wartości co wielkości ochronne, to pozwalają na ich wiarygodną ocenę w sposób konserwatywny (ograniczający możliwość niedoszacowania dawki).

Informacja dozymetryczna oparta na systemie wielkości operacyjnych jest w większości przypadków, szczególnie w zastosowaniach medycznych, jedyną dostępną informacją do oceny narażenia radiacyjnego. Z tego powodu znajomość koncepcji systemu wielkości

operacyjnych oraz ich relacji z wielkościami ochronnymi, dla których wyznaczono limity narażenia, jest kluczowa z punktu widzenia szacowania ryzyka radiacyjnego czy podejmowania decyzji o odsunięciu od pracy z tytułu przekroczenia bezpiecznych poziomów narażenia przez osoby uprawnione.

RODZAJE WIELKOŚCI DOZYMetrycznych STOSOWANYCH W OCHRONIE RADIOLOGICZNEJ

Wielkości dozymetryczne, które ewaluowały wraz z rozwojem dziedzin nauki, takich jak fizyka, radiobiologia, epidemiologia czy medycyna (1), obecnie podzielić można na 3 grupy (tab. 1):

- podstawowe wielkości dozymetryczne,
- dozymetryczne wielkości ochronne,
- dozymetryczne wielkości operacyjne.

Podstawowe wielkości dozymetryczne

Pierwsza grupa wielkości dozymetrycznych opisuje wielkości odnoszące się bezpośrednio do fizycznej interakcji pól promieniowania jonizującego z materią. Podstawowymi wielkościami w tej grupie są:

- fluencja – wyrażona jest w m^{-2} , a zdefiniowana jako liczba cząstek przechodząca przez zadaną powierzchnię czynną;
- dawka pochłonięta – wyrażona jest w grejach (Gy), odnosi się do średniej energii promieniowania przekazanej elementowi materii o jednostkowej masie;
- kerma – wyrażona jest w grejach (Gy), a zdefiniowana jako suma początkowych energii kinetycznych cząstek naładowanych jednego znaku, które uwolnione zostały przez cząstki pozbawione ładunku elektrycznego w jednostkowej masie (wielkość ta mierzona jest w polach promieniowania fotonowego i neutronowego).

W odniesieniu do energii promieniowania z zakresu rentgenodiagnostyki różnice między kerma w powietrzu a dawką pochłoniętą są małe, tzn. poniżej 0,1%. W przypadku wyższych energii (np. radioterapia) – ze względu na występowanie i znaczący udział promieniowania hamowania w całkowitej wiązce promieniowania, które jest w przypadku kermy uwzględniane z definicji – wartość kermy rośnie w stosunku do dawki pochłoniętej. Dla przykładu dla wiązki fotonowej o energii 1 MeV kerma jest większa od dawki pochłoniętej o ok. 0,4%.

Należy wspomnieć, że kerma jest w praktycznym zastosowaniu dozymetrycznym jednostką niezwykle ważną – w tej wielkości bowiem wzorcowanych jest

Tabela 1. Zestawienie wielkości dozymetrycznych używanych w ochronie radiologicznej
Table 1. Summary of dosimetric quantities used in radiological protection

Wielkości dozymetryczne Dosimetric quantities	Symbol Symbol	Jednostka Unit	Wzór Formula	Definicja Definition
Dozymetryczne wielkości podstawowe / / Dosimetric basic quantities				
dawka pochłonięta / absorbed dose	D	Gy [J/kg]	$D = d \epsilon / dm$	średnia energia ϵ przekazana przez promieniowanie jonizujące materii w elemencie objętości o masie dm / mean energy ϵ imparted by ionizing radiation to matter in a volume element of mass dm
kerma	K	Gy [J/kg]	$K = dE_{tr} / dm$	początkowa energia kinetyczna E_{tr} wszystkich cząstek naładowanych, uwolnionych pod wpływem nienaładowanej cząstki promieniowania jonizującego, w elemencie objętości o masie dm / initial kinetic energy E_{tr} of all charged particles released under the influence of uncharged particle radiation, per unit of mass dm
fluencja / fluence	Φ	m^{-2}	$\Phi = dN / da$	liczba cząstek dN przechodząca przez daną powierzchnię czynną da / the quotient of dN by da , where dN is the number of particles which enter a cross-sectional area da
Dozymetryczne wielkości ochronne / / Dosimetric protection quantities				
dawka równoważna / equivalent dose	H_T	Sv [J/kg]	$H_T = \sum_R w_R \times D_T$	suma iloczynu dawki pochłoniętej D w tkance T i współczynników wagowych w_R danego typu promieniowania R / the sum of the product of the absorbed dose D in tissue T and the weighting factors w_R of radiation type R
dawka efektywna / effective dose	E	Sv [J/kg]	$E = \sum_T w_T \times H_T$	suma równoważników dawki H_T , w_T wszystkich narządach i tkankach T z uwzględnieniem współczynników wagowych tkanek w_T / the sum of dose equivalent H_T in all organs and tissues, including T tissue weighting factors w_T
Dozymetryczne wielkości operacyjne / / Dosimetric operational quantities				
przestrzenny równoważnik dawki / / ambient dose equivalent	$H^*(d)$	Sv [J/kg]	–	równoważnik dawki w punkcie pola promieniowania, który byłby wytworzony przez odpowiednie pole rozciągnięte i zorientowane w kuli ICRU na głębokości d / the dose equivalent at the point of interest which would be generated in the associated oriented and expanded radiation field at a depth of d on the radius of the ICRU sphere which is oriented opposite to the direction of incident radiation
kierunkowy równoważnik dawki / / directional dose equivalent	$H'(d, \Omega)$	Sv [J/kg]	–	równoważnik dawki w punkcie pola promieniowania, który byłby wytworzony przez odpowiednie rozciągnięte pole w kuli ICRU na głębokości d , na promieniu skierowanym w określonym kierunku Ω / the dose equivalent at the point of interest which would be generated in the associated expanded radiation field at a depth of d on the radius of the ICRU sphere which is oriented in the fixed direction Ω
indywidualny równoważnik dawki / / personal dose equivalent	$H_p(d)$	Sv [J/kg]	–	równoważnik dawki w miękkiej tkance, na odpowiedniej głębokości d , poniżej określonego punktu w ciele / dose equivalent in soft tissue at the desired depth d below a certain point within the body

D – dawka pochłonięta / absorber dose; ϵ – energia / energy; E_{tr} – energia kinetyczna / kinetic energy; m – masa / mass; a – powierzchnia czynna / cross-sectional area; w_R – współczynnik wagowy promieniowania / radiation weighting factors; D_T – dawka pochłonięta w tkance T / absorber dose in tissue T ; w_T – tkanowy współczynnik wagowy / tissue weighting factors in tissue T ; H_T – równoważnik dawki w tkance T / dose equivalent in tissue T ; d – głębokość / depth; Ω – kierunek / direction.

większość mierników promieniowania, zarówno pasywnych, jak i aktywnych.

Dozymetryczne wielkości ochronne

Wielkości podstawowe są niewystarczające do opisu dozymetrycznego w przypadku oddziaływania z organizmem żywym i dlatego nie mogą być wykorzystane do ustalania limitów narażenia. Związane jest to z tym, że przy tym samym poziomie dawki pochłoniętej różne typy promieniowania jonizującego wywołują w ekspozowanym materiale jonizację o różnej gęstości. Znaczącą rolę w tym procesie odgrywa oczywiście rodzaj ekspozowanej struktury biologicznej. Wydajność indukcji zmian biologicznych w organizmach żywych zależna jest więc od liniowego transferu energii (linear energy transport – LET), tj. liczby jonizacji wywołanych w ekspozowanym materiale na jednostkę drogi pokonywaną przez promieniowanie (2).

Zazwyczaj trudne jest także jednoznaczne ustalenie składu oraz rozkładu spektralnego promieniowania depozycją energię w materiale biologicznym, szczególnie w przypadku pól mieszanych. Wielkości ochronne uwzględniają wspomniane wyżej efekty i dlatego ich pomiar oddaje lepiej realny poziom napromienienia. Przy pochłonięciu energii od pól promieniowania określonego typu stosuje się odpowiednio:

- dawkę równoważną H_T – do opisu narażenia poszczególnych tkanek i organów,
- dawkę efektywną E – do opisu narażenia całego ciała.

Obydwie wielkości podawane są w siwertach (Sv), których wymiar fizyczny jest identyczny z grejem (Gy). Zmiana nazwy jednostki sugeruje jednak jej powiązanie z biologicznym oddziaływaniem promieniowania.

W celu uzyskania informacji o dawce równoważnej H_T w danym narządzie/tkance konieczne jest pomnożenie średniej dawki pochłoniętej w tym obszarze przez bezwymiarowy współczynnik wagowy promieniowania w_R , uwzględniający względną skuteczność biologiczną danego typu promieniowania. W przypadku pól mieszanych dawka równoważna jest sumą iloczynu dawek pochłoniętych w danym obszarze i odpowiadającym im współczynnikom wagowym promieniowania. Fotony i cząstki beta cechują się niskim LET, co oznacza, że jonizują atomy stosunkowo rzadko (ok. 2 keV/ μ m), podczas gdy gęstość jonizacji wywołana przejściem przez materię np. cząstek alfa jest nieporównywalnie większa (do 230 keV/ μ m). Metody wyznaczenia oraz wartości samych współczynników w_R opisane zostały w publikacji ICRP 103 (3), a ich liczbowe wartości w odniesieniu do poszczególnych typów promieniowania przedstawiono w tabeli 2.

W celu otrzymania dawki efektywnej E konieczne jest natomiast zsumowanie wszystkich dawek równoważnych we wszystkich ekspozowanych narządach i tkankach z uwzględnieniem przypisanych im bezwymiarowych tkankowych współczynników wagowych w_T (tab. 3). Współczynniki te pozwalają na uwzględnienie różnych stopni czułości radiobiologicznej poszczególnych narządów i tkanek z punktu widzenia możliwości wywołania przez promieniowanie jonizujące skutków stochastycznych (3).

Suma wszystkich współczynników wagowych w_T równa jest jedności. Oznacza to, że jeżeli w konsekwencji napromienienia całego organizmu wystąpi nowotwór popromienny, dany współczynnik w_T określał będzie prawdopodobieństwo jego lokalizacji w danej tkance lub w narządzie.

Tabela 2. Wartości współczynników wagowych promieniowania w_R dla poszczególnych typów promieniowania według ICRP 103 (3)
Table 2. Radiation weighting factors w_R for different types of radiation recommended by ICRP 103 (3)

Rodzaj promieniowania Radiation type	w_R
Fotony (X i γ) / Photons (X and γ)	1
Elektrony i miony / Electrons and muons	1
Protony i naładowane piony / Protons and charged pions	2
Cząstki α , ciężkie jony, fragmenty rozszczepienia / Alpha particles, heavy ions, fission fragments	20
Neutrony / Neutrons	2–20*

Tabela 3. Wartości tkankowych współczynników wagowych w_T dla poszczególnych tkanek i narządów według ICRP 103 (3)
Table 3. Tissue weighting factors w_T for different tissues and organs recommended by ICRP 103 (3)

Tkanka Tissue	w_T	Σw_T
Czerwony szpik kostny, jelito grube, płuca, żołądek, pierś, pozostałe tkanki* / Red bone-marrow, colon, lung, stomach, breast, remainder tissues*	0,12	0,72
Gonady / Gonads	0,08	0,08
Pęcherz, przełyk, tarczycza, wątroba / Bladder, oesophagus, thyroid, liver	0,04	0,16
Skóra, powierzchnia kości, mózg, gruczoł ślinowy / Skin, bone surface, brain, salivary gland	0,01	0,04
Razem / Total		1

ICRP – Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej / International Commission on Radiological Protection.

* Pozostałe tkanki: nadnercza, pęcherzyk żółciowy, serce, nerki, węzły chłonne, mięśnie, błona śluzowa, trzustka, prostata, jelito cienkie, śledziona, grasicca, macica, górna część układu pokarmowego i oddechowego / Remainder tissues: adrenals, gall bladder, heart, kidneys, lymph nodes, muscles, mucous membrane, pancreas, prostate, small intestine, spleen, thymus, uterus, upper part of the digestive and respiratory systems.

Wartości współczynników wagowych promieniowania i tkanek, które występują w definicjach dawki równoważnej i efektywnej, wyznaczone zostały w oparciu o szerokie badania radiobiologiczne i stanowią wartości średnie reprezentatywne dla obu płci.

Dozymetryczne wielkości operacyjne

Jak już wspomniano, problem bezpośredniej oceny dawki równoważnej czy efektywnej wymusił wprowadzenie dodatkowego pakietu wielkości do systemu jednostek dozymetrycznych. W dokumencie ICRU 51 (4) po raz pierwszy zdefiniowano tzw. wielkości operacyjne pozwalające na realną ocenę wielkości ochronnych od zewnętrznych emiterów promieniowania jonizującego – bez implementacji zaawansowanych metod obliczeniowych, tak, że ich bezpośredni pomiar możliwy jest do zrealizowania w ramach prowadzonej rutynowo dozymetrii osób ekspozowanych zawodowo.

Wielkości operacyjne bazują na koncepcji dawki równoważnej H , będącej iloczynem dawki pochłoniętej oraz współczynnika jakości promieniowania Q w funkcji LET w wodzie. Dawka równoważna zależy od rodzaju i energii promieniowania. Uwzględnia również prawdopodobieństwo wystąpienia stochastycznych skutków biologicznych (5). Współczynnik jakości promieniowania Q zależy od LET w następujący sposób:

$$Q(\text{LET}) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \text{LET} < 10 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 0,32 \times \text{LET} - 2,2 & \text{gdy } 10 \leq \text{LET} \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 300/\sqrt{\text{LET}} & \text{gdy } \text{LET} > 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \end{cases}$$

gdzie:

LET – liniowy transfer energii (linear energy transport);

$Q(\text{LET})$ – współczynnik jakości promieniowania zależny od LET.

W zależności od specyfiki i miejsca ekspozycji oraz potrzeb pomiarowych, wielkości operacyjne służą do oceny dozymetrycznej w 2 obszarach:

- kontroli środowiska pracy (dozymetria środowiskowa),
- kontroli indywidualnej personelu narażonego na promieniowanie jonizujące (dozymetria indywidualna).

Kontrola środowiska (dozymetria środowiskowa) służy do oceny narażenia *a priori* i może być wykorzystana np. do ustalenia odpowiedniej kategorii narażenia (A – powyżej 6 mSv/rok lub B – powyżej 1 mSv/rok), ustalenia bezpiecznego czasu przebywania w polach promieniowania czy weryfikacji stopnia skuteczności osłon zabezpieczających przed nadmiernym napromieniowaniem. Z kolei kontrola indywidualna (dozymetria indywidualna) sprowadza się do oceny *a posteriori* dawki rzeczywiście zaabsorbowanej przez pracownika w danym okresie.

W dozymetrii środowiskowej oceny dozymetrycznej dokonuje się z wykorzystaniem 2 wielkości operacyjnych:

- kierunkowego równoważnika dawki $H'(d, \Omega)$ – tj. równoważnika dawki w danym punkcie rzeczywistego pola promieniowania, jaki byłby wytworzony przez odpowiednie, rozciągnięte pole w kuli ICRU

(kula o średnicy 30 cm i gęstości 1 g/cm², wykonana z materiału o składzie masowym tożsamym tkance) na danej głębokości d , na promieniu skierowanym w określonym kierunku Ω (przy czym pole rozciągle określa się jako hipotetyczne pole promieniowania, w którym fluencja cząstek oraz jej rozkład kierunkowy i energetyczny mają w całym obszarze pomiarowym takie same wartości jak w rozpatrywanym punkcie pola rzeczywistego) (5);

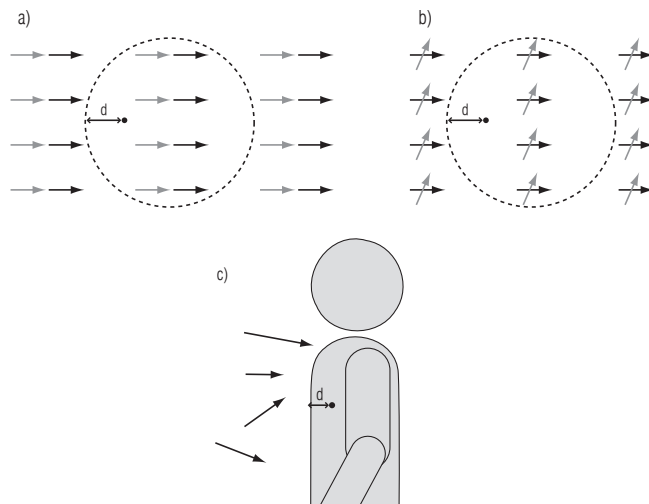
- przestrzennego równoważnika dawki $H^*(d)$ – tj. równoważnika dawki w danym punkcie rzeczywistego pola promieniowania, jaki byłby wytworzony przez odpowiednie, rozciągle i zorientowane pole w kuli ICRU na danej głębokości d (przy czym pole rozciągle i zorientowane określa się jako hipotetyczne pole promieniowania, w którym fluencja oraz jej rozkład przestrzenny i energetyczny są takie same jak dla pola rozciąglego, ale sama fluencja ma wyróżniony kierunek) (5).

W dozymetrii indywidualnej operujemy natomiast pojęciem indywidualnego równoważnika dawki $H_p(d)$, tj. równoważnika dawki w tkance miękkiej, na danej głębokości d , w danym punkcie pod powierzchnią ciała (tab. 1).

Ideę pomiaru opisanych powyżej dozymetrycznych wielkości operacyjnych ilustruje rycina 1.

Charakter i natężenie promieniowania powoduje, że może być ono silnie przenikliwe bądź przenikające przez materię słabo. Za promieniowanie słabo przenikliwe uważa się cząstki α i β o energiach poniżej 2 MeV, a także fotony o energiach poniżej 15 keV. Promieniowanie neutronowe niezależnie od energii zawsze jest silnie przenikliwe.

Dla promieniowania przenikliwego zaleca się stosowanie wielkości $H^*(d)$ i $H_p(d)$, gdzie $d = 10$ mm (czyli $H^*(10)$ i $H_p(10)$), i rekomenduje się stosowanie tych wielkości do oceny narażenia całego ciała. Dla promieniowania o niższej przenikliwości rekomenduje się stosowanie równoważni-



H^* – przestrzenny równoważnik dawki / ambient dose equivalent.

H' – kierunkowy równoważnik dawki / directional dose equivalent.

H_p – indywidualny równoważnik dawki / personal dose equivalent.

d – głębokość / depth.

Ω – kierunek / direction.

Ryc. 1. Interpretacja graficzna pomiaru: a) kierunkowego równoważnika dawki $H'(d, \Omega)$, b) przestrzennego równoważnika dawki $H^*(d)$ i c) indywidualnego równoważnika dawki $H_p(d)$

Fig. 1. Graphical interpretation of measurement of: a) directional dose equivalent $H'(d, \Omega)$, b) ambient dose equivalent $H^*(d)$ and c) personal dose equivalent $H_p(d)$

ków dawek $H'(d, \Omega)$ i $H_p(d)$, gdzie grubości $d = 0,07$ mm i $d = 3$ mm stosuje się w zależności od tego, czy oceniamy narażenie skóry, czy soczewek oczu (tab. 4).

RELACJE MIĘDZY WIELKOŚCIAMI DOZYMETRYCZNYMI

Skutki zdrowotne związane z oddziaływaniem promieniowania jonizującego na organizm człowieka dzielimy na:

- stochastyczne – szkodliwe następstwa genetyczne spowodowane mutacją komórek,
- deterministyczne – szkodliwe reakcje tkankowe spowodowane uszkodzeniem lub zabiciem znacznej liczby komórek.

Tabela 4. Zestawienie dozymetrycznych wielkości operacyjnych i obszarów ich wykorzystania
Table 4. Summary of dosimetric operational quantities and areas of their use

Promieniowanie Radiation	Obszar pomiaru Limiting quantity	Wielkość operacyjna Operational quantity	
		kontrola środowiska pracy work area monitoring	kontrola indywidualna individual monitoring
Silnie przenikliwe / Strongly penetrating	całe ciało / whole body	$H^*(10)$	$H_p(10)$
Słabo przenikliwe / Weakly penetrating	skóra / skin	$H'(0,07, \Omega)$	$H_p(0,07)$
	soczewka oka / eye lens	$H'(3, \Omega)$	$H_p(3)$

Objaśnienia jak na ryc. 1 / Abbreviations as in Fig. 1.

Weryfikacja wystąpienia skutków stochastycznych oparta jest na analizie poziomu dawki efektywnej E , podczas gdy skutków deterministycznych dla skóry i oczu spodziewamy się po przekroczeniu właściwych dla danych narządów poziomów dawek równoważnych. Należy przy tym podkreślić, że limity dawek efektywnych są tak ustalone, aby skutki deterministyczne w narządach i tkankach wymienione w definicji dawki efektywnej nie wystąpiły. Dawka efektywna zawiera dla przykładu współczynnik wagowy dla całej skóry, podczas gdy efektów deterministycznych spodziewamy się na małych powierzchniach (limit dawki równoważnej dla skóry odnosi się do wartości średniej dla dowolnej powierzchni 1 cm^2 napromienionej części skóry).

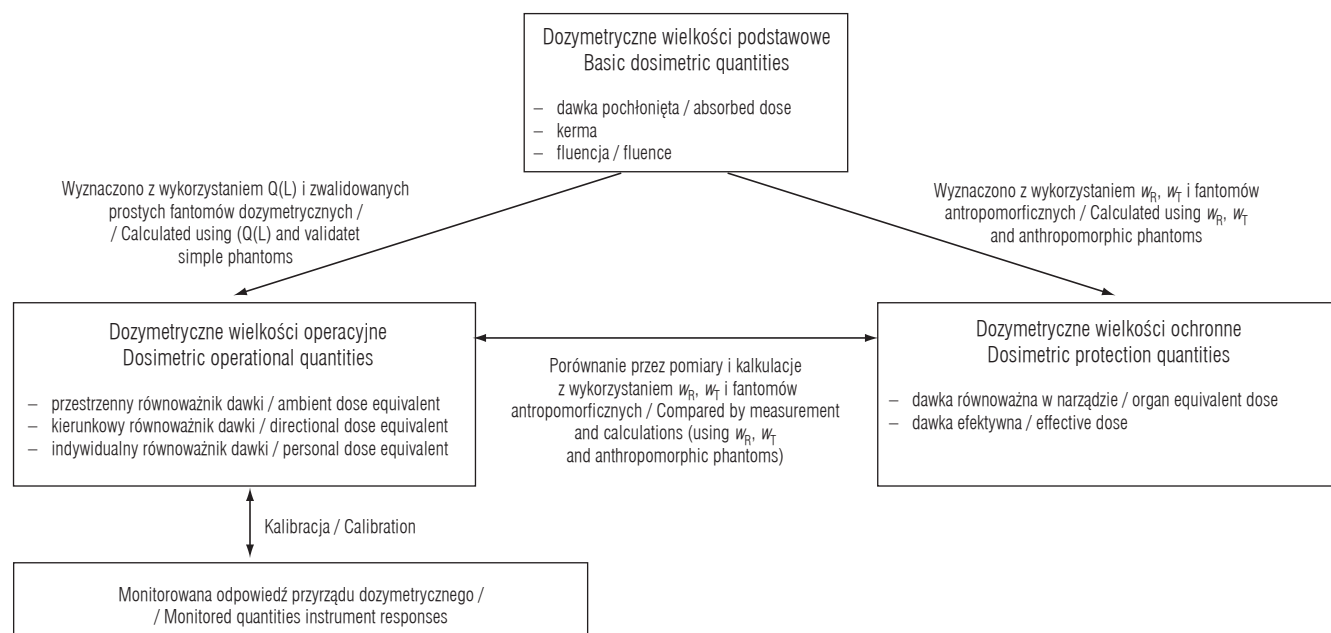
W celu dokładnego podejścia do oceny wielkości ochronnych, w szczególności dla osób pracujących w niskim narażeniu, oszacowanie dawki efektywnej i równoważnej z podstawowych wielkości dozymetrycznych możliwe jest dzięki prowadzeniu badań z wykorzystaniem fantomów antropomorficznych oraz użyciu odpowiednich współczynników przeliczeniowych Sv/Gy dla poszczególnych narządów wewnętrznych i zewnętrznych. Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) oraz Międzynarodowa Komisja ds. Jednostek Promieniowania i Pomiarów (ICRU) definiują odpowiednie matematyczne fantomy komputerowe osób dorosłych obu płci. Odnoszą się one bezpośrednio do modelu standardowego człowieka ICRP (6) i bazują na

dokładnych danych anatomicznych z obrazów tomografii komputerowej (7).

Dla odróżnienia – przejście od wielkości podstawowych do operacyjnych, które stanowią konserwatywne oszacowanie dawki równoważnej bądź efektywnej, przeprowadza się przy użyciu współczynników konwersji Sv/Gy, pozyskanych z badań na prostych fantomach – wodnych lub wykonanych z płyt poliakrylanu metylu. Zapewniają one rozpraszanie i osłabianie promieniowania reprezentatywne dla poszczególnych części ciała. Stosowanie modeli uproszczonych, a także uśredniane wartości dawki pochłoniętej w skali większych objętości tkanek i narządów jest w obszarze małych dawek uznane za wystarczająco dokładne.

Schemat zależności między wielkościami dozymetrycznymi a procesem przejścia od Gy do Sv dla poszczególnych wielkości dozymetrycznych prezentuje rycina 2.

Posługując się systemem wielkości dozymetrycznych, należy być więc świadomym, że pomiary realizowane z wykorzystaniem rutynowej dozymetrii osób zawodowo narażonych, tj. oparte na wielkościach operacyjnych, nie mają na celu dokładnego określenia wielkości ochronnych. Celem jest za to uzyskanie wartości przybliżonej w sposób konserwatywny po to, żeby zminimalizować ryzyko niedoszacowania wielkości ochronnej, która następnie odnoszona jest do dopuszczalnych rocznych limitów dawek (tab. 5).



Ryc. 2. Wielkości dozymetryczne i ich wzajemne relacje
Fig. 2. Dosimetric quantities and their interrelations

Tabela 5. Roczne limity dawek dla różnych grup
Table 5. Annual dose limits for various groups

Grupa Group	Dawka efektywna [mSv/rok] Effective dose [mSv/year]	Dawka równoważna [mSv/rok] Equivalent dose [mSv/year]		
		oczy eyes	skóra skin	dłonie, przedramiona, stopy, podudzia hands, forearms, feet, lower legs
Populacja (ogółem) / General population	1	15	50	–
Uczniowie i praktykanci w wieku 16–18 lat / / Students and trainees aged 16–18 years	6	50	150	150
Zawodowo narażeni / Occupationally exposed	20	150*	500	500

Projekt Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej zmiany limitu do 20 mSv / International Commission on Radiological Protection – the drafted amendment of the limit to 20 mSv (8).

Dla promieniowania fotonowego w większości przypadków wielkość $H_p(10)$ dobrze przybliża ocenę dawki efektywnej E .

Przy niższych energiach promieniowania (do 30 keV) mamy do czynienia ze znacznym przeszacowaniem (nawet 6-krotnym), natomiast powyżej 5 MeV – z niewielkim przeszacowaniem dawki efektywnej E (8–13).

Przy ocenie $H^*(10)$ również w szerokim zakresie energii dawka efektywna E jest przeszacowana, więc precyzyjna znajomość energii oraz kierunku padania promieniowania jest konieczna w celu skorygowania jej wartości (7).

IMPLEMENTACJA WIEKOŚCI DOZYMTRYCZNYCH W DOZYMETRII INDYWIDUALNEJ

Monitoring radiacyjny osób zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące prowadzony jest za pomocą metod dozymetrii indywidualnej i środowiskowej, opartej w głównej mierze na pasywnych detektorach promieniowania, tj.:

- detektorach filmowych,
- detektorach termoluminescencyjnych (thermoluminescent dosimeter – TLD),
- detektorach luminencyjnych stymulowanych światłem lasera (optically stimulated luminescence – OSL),
- detektorach szklanych (radiophotoluminescent – RPL).

W Polsce oceną dawek dla pracowników zajmują się laboratoria akredytowane przez Polskie Centrum Akredytacji, w tym Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi, Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, a także Narodowe

Centrum Badań Jądrowych w Otwocku oraz Główny Instytut Górnictwa (na potrzeby górnictwa).

W zależności od tego, czy prowadzony jest monitoring środowiska pracy, czy monitoring indywidualny personelu, odmiennie realizuje się proces przygotowania dozymetrów do pomiarów. Detektory pasywne wymagają tzw. kalibracji, czyli ustalenia ich odpowiedzi dawkowej i energetycznej w stosunku do wzorcowych wartości dawek mierzonych referencyjnymi komorami jonizacyjnymi. W obydwu przypadkach pomiaru dokonuje się w jednostkach wielkości podstawowej – kermie w powietrzu (Gy), którą następnie przy wykorzystaniu zależnych od energii promieniowania współczynników konwersji Sv/Gy zamienia się na jednostkę wielkości operacyjnych (Sv), zgodnie z zaleceniami ISO 4037-3 (14).

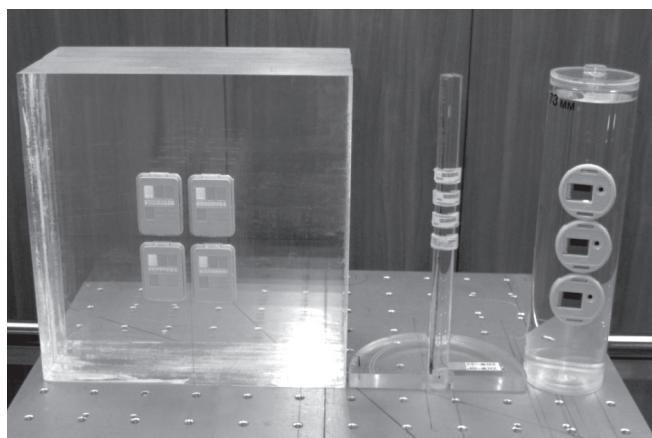
W przypadku dozymetrii środowiskowej kalibracji dokonuje się w powietrzu, natomiast w dozymetrii indywidualnej proces kalibracji przeprowadza się z wykorzystaniem fantomów dozymetrycznych, omówionych szczegółowo w tabeli 6 (15). Ich wygląd wraz z umieszczonymi na nich dozymetrami przedstawiono na fotografii 1.

Fantomy kalibracyjne wykorzystywane są do symulacji osoby ekspozowanej lub odpowiedniej części jej ciała oraz do wytwarzania promieniowania rozproszonego, które powoduje wzrost dawki w badanym obszarze. Kalibracja wykonywana jest w określonych wiązkiach promieniowania, których parametry zdefiniowano w ISO 4037-1 (16) i dla których współczynniki konwersji Sv/Gy w zależności od energii promieniowania i pożądanego wielkości operacyjnej są znane i przyjmują konkretne wartości. Następnie przygotowane dozymetry są umieszczane w miejscu reprezentatywnym dla narażenia personelu (dozymetria środowiskowa)

Tabela 6. Właściwości znormalizowanych fantomów kalibracyjnych (15)
Table 6. Properties of recommended calibration phantoms (15)

Nazwa fantomu Phantom name	Kształt, wymiary i materiał Shape, dimensions and materials	Kalibrowana wielkość dozymetryczna Calibrated dosimetric quantity	Miejsce noszenia dozymetru Wearing position of dosimeter
Wodny fantom płytowy / / Water slab phantom	sześcian – 30×30×15 cm; ścianki PMMA, wypełniony wodą / slab: 30×30×15 cm; PMMA walls, filled with water	$H_p(10)$, $H_p(0,07)$	tułów / trunk
Fantom słupowy / Pillar phantom	cylinder – średnica: 7,3 cm, wysokość: 30 cm; ścianki PMMA, wypełniony wodą / cylinder – diameter, 7.3 cm, length, 30 cm: PMMA walls, filled with water	$H_p(0,07)$	nadgarstek, kostka / wrist, ankle
Fantom prętowy / Rod phantom	cylinder – średnica: 1,9 cm, wysokość: 30 cm; PMMA / / cylinder – diameter, 1.9 cm, length, 30 cm, PMMA	$H_p(0,07)$	palec / finger

H_p – indywidualny równoważnik dawki / personal dose equivalent.
 PMMA – poli(metakrylan metylu) / poly(methyl methacrylate).



Od lewej: wodny fantom płytowy, fantom prętowy, fantom słupowy / From left: water slab phantom, rod phantom, pillar phantom.

Fot. 1. Fantomy kalibracyjne z umieszczonymi dozymetrami
Photo 1. Calibration phantoms with dosimeters

bądź umieszczane na ciele personelu w miejscu, w którym narażenie ma być ocenione (dozymetria indywidualna).

W przypadku oceny dawki efektywnej na całe ciało dozymetr noszony jest na klatce piersiowej, natomiast dla oceny dawek równoważnych na skórę – w zależności od konstrukcji dozymetru – na palcu lub nadgarstku.

W większości przypadków oceny dawki równoważnej dla soczewek oczu $H_p(3)$ dokonuje się poprzez aproksymację $H_p(0,07)$ i $H_p(10)$ (17). Brak standaryzowanych współczynników konwersji dla tej wielkości oraz znormalizowanego fantomu głowy, z którego użyciem możliwa jest właściwa kalibracja detektorów, powodował, że przez wiele lat wielkość $H_p(3)$ była niewy-

korzystywana do oceny narażenia soczewek oczu (18). Ostatnie badania, które wykazały możliwość indukcji katarakty popromiennej po przekroczeniu 0,5 Gy (a nie jak dotąd uważano 5 Gy) (19,20), doprowadziły jednak do powstania idei obniżenia limitu narażenia dla tego organu ze 150 mSv do 20 mSv na rok (8).

Wielkości $H_p(10)$ i $H_p(0,07)$ w rutynowej dozymetrii indywidualnej bardzo rzadko wykazują przekroczenia rocznych limitów narażenia (21,22), a średnie wartości dawek efektywnych znajdują się na poziomie 0,4–1,0 mSv (23). Inaczej wygląda sytuacja w przypadku narażenia soczewek oczu. Według szacunków dla nowego limitu dawki na soczewkę oka w niektórych aplikacjach medycznych personel może być narażony na roczne przekroczenia limitu dawki równoważnej przewlekłe (24). Dotyczy to w szczególności procedur z zakresu kardiologii i radiologii zabiegowej, a wynika z charakterystyki ich wykonywania. Podczas nich bowiem personel medyczny znajduje się w bezpośredniej bliskości pierwotnej wiązki promieniowania X oraz w polu promieniowania rozproszonego, którego źródłem jest pacjent.

Tematem prac wielu ośrodków naukowych są obecnie badania nad wdrożeniem dozymetrii indywidualnej soczewek oczu. Między innymi tej tematyce poświęcony został zakończony w 2011 roku europejski projekt ORAMED FP7 (Optimization of Radiation Protection for Medical Staff) (25). W jego ramach zweryfikowano rzeczywisty poziom narażenia radiacyjnego w pracowniach hemodynamiki, w tym soczewek oczu oraz nieosłoniętych fartuchem ołowiowym części ciała (24,26), odniesiono to narażenie do rocznych limitów narażenia (27) i wydano rekomendacje służące zmini-

malizowaniu narażenia (28). Zaprojektowano także m.in. odpowiedni dozymetr, noszony na skroni, który z pewnością pozwoli na lepszą ocenę narażenia radiacyjnego oczu jako narządu krytycznego (29).

PODSUMOWANIE

Obecny system wielkości dozymetrycznych pozwala na wiarygodną ocenę radiacyjnego narażenia zawodowego. System wielkości operacyjnych wdrożony w rutynowej dozymetrii indywidualnej i środowiskowej sprawia, że ocena dawki efektywnej i równoważnej jest możliwa przy wykorzystaniu stosunkowo nieskomplikowanych pomiarów dozymetrycznych, w których wykorzystywane są dobrze znane i mierzalne wielkości fizyczne.

Należy zdawać sobie jednak sprawę z istnienia pewnych ograniczeń systemu wielkości dozymetrycznych oraz z tego, że najlepsze rezultaty w ocenie uzyskujemy dla dawek promieniowania dużo niższych od obowiązujących limitów narażenia. Zgodnie z publikacją ICRU 51 (4) w przypadku dawek bliskich ww. limitom lub powyżej ich wartości konieczne staje się wyjaśnienie sposobu i miejsca użytkowania dawkomierza oraz uzyskanie wszystkich dostępnych informacji o charakterze ekspozycji (np. jednorazowa, przewlekła).

W świetle najnowszych danych dotyczących narażenia soczewek oczu wydaje się, że stosowana dotąd sporadycznie dozymetryczna wielkość operacyjna $H_p(3)$ stanie się w niedługiej przyszłości wielkością rutynowo ocenianą metodami dozymetrii indywidualnej.

PIŚMIENNICTWO

- Pradhan A.: Evolution of dosimetric quantities of International Commission on Radiological Protection (ICRP): Impact of the forthcoming recommendations. *J. Med. Phys.* 2007;32(3):89–91
- Przybyszewski W.M., Wideł M., Szurko A., Maniakowski Z.: Wpływ mocy dawki na komórkowe, biochemiczne i molekularne efekty promieniowania jonizującego. *Postępy Hig. Med. Dośw.* 2008;62:468–477
- International Commission on Radiological Protection: Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP* 2007;37(2–4):62–71
- International Commission on Radiation Units and Measurements: Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51. ICRU Publications, Bethesda 1993
- PN-J-01003-02:1992. Technika jądrowa – nazwy i określenia – wielkości i jednostki. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1992
- International Commission on Radiological Protection: Publication 89: Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. *Ann. ICRP* 2002;32(3–4):15–24
- European Commission: Radiation Protection 160: Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation [cytowany 3 września 2012]. Commission, Luxembourg 2009. Adres: http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/160.pdf
- International Commission on Radiological Protection: Publication 118: ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. *Ann. ICRP* 2012;41(1–2):205–208
- International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU Report 57: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRU Publications, Bethesda 1998
- International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 74: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. *Ann. ICRP* 1996;26(3–4):83–94
- International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP* 1991;21(1–3):60–65
- International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP* 2007;37(2–4):61–65
- International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 110: Adult Reference Computational Phantoms. *Ann. ICRP* 2009;39(2):88–93
- ISO 4037-3:1997. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. International Organization for Standardization, Geneva 1997
- Stadtmann H.: Dose quantities in radiation protection and dosimeters calibration. *Radiat. Prot. Dosim.* 2001;96(1–3): 21–26
- ISO 4037-1:1996. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Radiation

- characteristics and production method. International Organization for Standardization, Geneva 1996
17. Behrens R., Engelhardt J., Figel M., Hupe1 O., Jordan M., Seifert M.: Hp(0.07) Photon dosimeters for eye lens dosimetry: calibration on rod vs. slab phantom. *Radiat. Prot. Dosim.* 2012;148(2):139–142
 18. Behrens R.: Air kerma to dose equivalent conversion coefficients not included in ISO 4037–3. *Radiat. Prot. Dosim.* 2010;147(3):373–379
 19. Chodick G., Bekiroglu N., Hauptmann M., Alexander B., Freeman M., Doody M. i wsp.: Risk of Cataract after Exposure to Low Doses of Ionizing Radiation. A 20-Year Prospective Cohort Study among US Radiologic Technologists [cytowany 29 sierpnia 2012]. *Am. J. Epidemiol.* 2008;168:620–631. Adres: <http://aje.oxfordjournals.org/search?author1=Nural+Bekiroglu&sortspec=date&submit=Submit>
 20. Worgul B.V., Kundiyevev Y.I., Sergiyenko N.M., Chumak V.V., Vitte P.M., Medvedovsky C. i wsp.: Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures [cytowany 29 sierpnia 2012]. *Radiat. Res.* 2007;167:223–243. Adres: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17390731>
 21. Papierz S., Kacprzyk J., Kamiński Z., Zmysłony M.: Ocena narażenia zawodowego na promieniowanie rentgenowskie i gamma w Polsce w roku 2010. *Med. Pr.* 2011;62(6): 579–582
 22. Budzanowski M., Kopeć R., Obryk B., Olko P.: Dose levels of the occupational radiation exposures in Poland based on results from the accredited dosimetry service at the IFJ PAN, Krakow. *Radiat. Prot. Dosim.* 2011;144(1–4): 107–110
 23. Kraska A., Bilski B.: Narażenie pracowników ochrony zdrowia na promieniowanie jonizujące a hipoteza hormezy radiacyjnej. *Med. Pr.* 2012;63(3):371–376
 24. Donadille L., Carinou E., Brodecki M., Domienik J., Jankowski J., Koukorava C. i wsp.: Staff eye lens and extremity exposure in interventional cardiology. Results of the ORAMED Project. *Radiat. Meas.* 2011;46(11):1203–1209
 25. European Radiation Dosimetry Group: ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff' EURADOS Report 2012–02. EURADOS, Braunschweig 2012
 26. Nikodemová D., Brodecki M., Carinou E., Domienik J., Donadille L., Koukorava C. i wsp.: Staff extremity doses in interventional radiology. Results of the ORAMED measurement campaign. *Radiat. Meas.* 2011;46(11): 1210–1215
 27. Krim S., Brodecki M., Carinou E., Donadille L., Jankowski J., Koukorava C. i wsp.: Extremity doses of medical staff involved in interventional radiology and cardiology. Correlations and annual doses (hands and legs). *Radiat. Meas.* 2011;46(11):1223–1227
 28. Carinou E., Brodecki M., Domienik J., Donadille L., Koukorava C., Krim S. i wsp.: Recommendations to reduce extremity and eye lens doses in interventional radiology and cardiology. *Radiat. Meas.* 2011;46(11):1324–1329
 29. Bilski P., Bordy J.-M., Daures J., Denoziere M., Fantuzzi E., Ferrari P. i wsp.: EYE-D™ dosimeter for measurements of $H_p(3)$ for medical staff [cytowany 3 września 2012]. *Radiat. Meas.* 2011;46(11):1239–1242. Adres: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448711001570>