

NOWE-STARE METODY REDUKCJI I MONITORINGU NARAŻENIA NA PROMIENIOWANIE RENTGENOWSKIE W ŚRODOWISKU ZABIEGOWYM

NEW-OLD METHODS OF REDUCING AND MONITORING X-RAY EXPOSURE
IN THE INTERVENTIONAL RADIOLOGY ENVIRONMENT

Mateusz Michał Mirowski

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

STRESZCZENIE

Odkrycie promieniowania jonizującego przyniosło wiele korzyści również w medycynie. Związane z nim ryzyko wywoływania chorób, takich jak nowotwory popromienne czy zaćma, skutkuje koniecznością monitorowania narażenia osób pracujących w ekspozycji na promieniowanie jonizujące za pomocą dozymetrii indywidualnej lub optymalizacji procedur medycznych. Istnieją 3 główne sposoby optymalizacji procedur medycznych – redukcja czasu, zwiększenie odległości oraz stosowanie osłon osobistych i stałych. Wraz z rozwojem nauki i techniki ewoluują sposoby zmniejszania dawki. Poza lepszą osłonnością wzrasta także ergonomia, jak w przypadku osłony Zero-Gravity i lekkich fartuchów bezolowiowych. Rośnie także świadomość konieczności stosowania osłon i prowadzenia zabiegu tak, aby zmniejszyć narażenie zarówno personelu, jak i pacjenta. Celem artykułu jest przedstawienie nowych metod ochrony przed promieniowaniem jonizującym w kontekście powyższych 3 pryncypiów ochrony radiologicznej. Med. Pr. 2021;72(1):49–59

Słowa kluczowe: radiologia interwencyjna, ochrona radiologiczna, promieniowanie rentgenowskie, kardiologia interwencyjna, osłony, sposoby redukcji i monitoringu

ABSTRACT

Ionizing radiation as a scientific achievement provides a variety of advantages, e.g., in the medical field. However, it also causes a risk of some illnesses, e.g., cataract or cancer. This results in the need to measure radiation doses and to reduce the unnecessary risk. There are 3 main methods of dose reduction, i.e., shortening the time of exposure, working as far as possible from the X-ray source, and using radioprotective shields. Together with the development of science and technology, dose reduction methods and radioprotection methods have also evolved. Besides improved shielding, the ergonomics is also more advanced, e.g., the zero-gravity shielding or light, and non-lead aprons. What is more, the awareness of using radiological protection and conducting the surgery in the safest way for both the staff and the patient is growing up. The goal of this article is to discuss the newest methods of radiation protection against the background of 3 main protection principles. Med. Pr. 2021;72(1):49–59

Key words: interventional radiology, radiation protection, X-rays, interventional cardiology, radiation shielding, methods of reduction and monitoring

Autor do korespondencji / Corresponding author: Mateusz Michał Mirowski, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Zakład Ochrony Radiologicznej, ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: mateusz.mirowski@imp.lodz.pl
Nadesłano: 28 maja 2020, zatwierdzono: 17 sierpnia 2020

WSTĘP

Promieniowanie jonizujące, w tym rentgenowskie (RTG), znajduje szerokie zastosowanie w diagnostyce i terapii medycznej. Już w krótkim czasie po odkryciu promieni RTG w listopadzie 1895 r. przez Wilhelma Conrada Roentgena zaczęto je wykorzystywać w celach

medycznych (były stosowane w czasie I wojny światowej m.in. przez Marię Skłodowską-Curie do diagnostyki w warunkach polowych). Oprócz korzyści, jakimi są przydatność w diagnostyce i leczeniu zmian nowotworowych, niosą one ze sobą ryzyko związane z wystąpieniem nowotworu lub choroby soczewki oka – zaćmy.

W myśl słów tworzących anglojęzyczny akronim ALARA (*as low as reasonably achievable* – tak nisko jak to rozsądnie możliwe) należy dążyć do takiego stanu, w którym bilans korzyści ze stosowania promieniowania RTG i związanego z nim ryzyka był jak najbardziej dodatni, czyli aby ryzyko wywołania choroby było jak najmniejsze, a wartość diagnostyczna lub terapeutyczna – jak największa. Dotyczy to zarówno pacjentów, jak i lekarzy pracujących w narażeniu na promieniowanie RTG, a także pozostałego personelu medycznego, np. techników rentgenodiagnostyki.

Celem niniejszego artykułu było zestawienie pojęć i zaleceń dotyczących ochrony radiologicznej w medycynie interwencyjnej (m.in. w kardiologii zabiegowej) wraz z przedstawieniem nowych metod oraz urządzeń, które pozwalają zmniejszyć ryzyko wystąpienia chorób popromiennych poprzez redukcję i kontrolę dawki u lekarzy wykonujących zabiegi interwencyjne przy użyciu promieniowania RTG. Spośród osób pracujących przy medycznej aparaturze diagnostycznej personel medyczny w radiologii zabiegowej jest najbardziej narażony na promieniowanie jonizujące, gdyż przebywa w pobliżu aparatu rentgenowskiego, nie obsługując go z bezpiecznej odległości, np. ze sterowni (jak w przypadku obrazowania z wykorzystaniem tomografii komputerowej). Ponadto podczas zabiegu z wykorzystaniem radiologii zabiegowej personel jest narażony na promieniowanie zarówno pierwotne, emitowane przez lampę RTG, jak i rozproszone, pochodzące głównie od pacjenta. Personel powinien więc być świadomy zagrożenia oraz poinformowany o sposobach jego redukcji i nowościach z zakresu ochrony radiologicznej.

METODY PRZEGLĄDU

Korzystając z zagranicznych baz piśmiennictwa, przeprowadzono przegląd publikacji z lat 2004–2019. Wyszukane artykuły poddano klasyfikacji na podtypy ze względu na metody i urządzenia służące ochronie radiologicznej m.in. lekarza kardiologa lub radiologa interwencyjnego.

WYNIKI PRZEGLĄDU

Zarys przeglądu

Problem szkodliwych następstw ekspozycji na promieniowanie jonizujące, w tym rentgenowskie, dostrzeżono już po kilku latach jego wykorzystywania w diagnostyce medycznej. Początkowo były to efekty związane z dużymi dawkami, jak np. oparzenia. Później odkryto

wpływ dawek mniejszych i skumulowanych na indukcję chorób lub występowanie mutacji. W artykułach uwzględnionych w niniejszym przeglądzie widać szerokie zainteresowanie tą tematyką, a wiele cytowanych w nim badań dotyczyło ekspozycji, m.in. w środowisku interwencyjnym [1–4].

Hausle i wsp. [1] mierzyli wśród personelu medycznego równoważniki dawek na całe ciało i poszczególne jego części (soczewkę oka, tarczę, dłonie, stopy) oraz korelacje pomiędzy ekspozycją operatora i personelu asystującego, typem zabiegu i dawką oraz dawkami dla personelu i pacjenta. Zaobserwowano m.in., że stosowanie fartucha ołowiowego zmniejszało 4-krotnie dawkę na całe ciało w porównaniu z sytuacją, w której fartuch nie był używany (mediana, odpowiednio: 4 μ Sv i 16 μ Sv) [1].

Lakhwani i wsp. [2] odnotowali, że w wielu państwach na świecie, w tym w Indiach, rośnie świadomość ryzyka związanego ze stosowaniem promieniowania RTG w medycynie, czemu towarzyszy wzrost znaczenia ochrony przed promieniowaniem i prowadzenia badań z zakresu ochrony radiologicznej. Badacze podają dane o blisko 2,5 mld przypadków w skali roku wykorzystania promieniowania RTG w samej tylko diagnostyce medycznej [2].

Metody ochrony radiologicznej stosowane m.in. w pracowniach zabiegowych opierają się na 3 podstawowych zasadach: zwiększonej odległości od źródła, możliwie krótkim czasie ekspozycji i stosowaniu osłon przed promieniowaniem jonizującym. Procedury medyczne nie zawsze umożliwiają redukcję otrzymanej dawki poprzez zwiększenie odległości od źródła, np. poprzez stosowanie dostępu przez tętnicę udową zamiast promieniową, przy którym lekarz stoi dalej od źródła promieniowania. Dostęp promieniowy ma tę zaletę w stosunku do udowego, że skutkuje mniejszym krwawieniem, co jest szczególnie ważne u pacjentów z podejrzeniem zawału mięśnia sercowego [5]. Kiedy nie można manipulować odległością, trzeba stosować 2 pozostałe zasady.

Również czas trwania zabiegu zależy od skomplikowania zmiany i zaawansowania procedury. Ruiz-Cruces i wsp. [6] wykazali, że czas ekspozycji podczas arteriografii kończyn dolnych wynosi 4 min oraz procedura wstawiania endoprotezy okrzynicy wymaga ok. 46 min emitowania promieni RTG. Co więcej, liczba zabiegów z wykorzystaniem promieniowania jonizującego rośnie, o czym może świadczyć m.in. wzrost liczby pracowni hemodynamicznych (w latach 2007–2009 w Polsce ich liczba zwiększyła się o 20) [7].

Mimo powstawania nowych metod redukcji dawki oferowanych przez nowoczesne aparaty rentgenowskie służące do fluoroskopii, oraz biorąc pod uwagę zasadę ALARA, należy stosować także osłony stałe i osobiste redukujące dawkę promieniowania RTG. Obecnie wykorzystuje się fartuchy wykonane głównie z gumy ołowiowej o zadanej grubości, osłony na tarczycę i gonady oraz okulary ze szkłami ołowiowymi. Ubiór taki zapewnia ochronę przed promieniowaniem jonizującym, ale jest relatywnie ciężki i wywołuje niekiedy uczucie dyskomfortu oraz może powodować problemy z układem kostno-stawowym.

Rozwój techniki przynosi jednak postęp nie tylko w efektywności używanych środków ochrony, ale także w ergonomii. Widoczne jest dążenie producentów osłon do zarówno minimalizowania otrzymywanej przez operatora dawki, jak i zmniejszenia dyskomfortu spowodowanego przeciążeniem osłonami osobistymi.

Nowe-stare sposoby – stosowanie osłon

Osłony osobiste – lekkie fartuchy ochronne

Stosowanie osłon osobistych podczas zabiegów z wykorzystaniem podglądu śródoperacyjnego pozwala zredukować uzyskaną dawkę u pielęgniarek i radiologów interwencyjnych znajdujących się w pobliżu źródła promieniowania RTG o blisko 2/3 [8].

Pierwszym sposobem ochrony przed promieniowaniem RTG w pracowni zabiegowej, łączącym tradycję z nowoczesnością, jest stosowanie lekkich fartuchów ochronnych. Obecnie do ich produkcji wykorzystuje się kompozyty niezawierające związków ołowiu lub z ich niewielką domieszką, dzięki czemu fartuchy są o ok. 25% lżejsze od tradycyjnych, ołowiowych odpowiedników. Jak wynika z informacji dystrybutorów, ulegają one ponadto recyklingowi lub przynajmniej są bezpieczniejsze w utylizacji. Jako materiał tłumiący wykorzystuje się w nich głównie związki bizmutu, berylu [9], wolframu, antymonu, tytanu, magnezu lub mieszaniny tych pierwiastków [10]. Stosowane pierwiastki cechują się lepszą niż ołów efektywnością w pochłanianiu fotonów promieniowania RTG w zakresie 40–88 keV. Fartuchy takie mogą z jednej strony stanowić lepszą barierę (w porównaniu z konwencjonalnym fartuchem ołowiowym) dla promieniowania rozproszonego, emitowanego z lampy RTG przy napięciach 70–80 kV. Z drugiej strony mogą gorzej chronić przed promieniowaniem powstałym przy napięciach na lampie RTG >100 kV [10].

Lu i wsp. [9] wykazali jednak, że fartuchy bezołowiowe mogą pochłaniać promieniowanie w stopniu

mniejszym niż podany przez producenta ekwiwalent grubości ołowiu. Badacze stwierdzili, że 47% przetestowanych części przednich 15 fartuchów bezołowiowych i 90% ich części tylnych cechowało się zawyżonym ekwiwalentem ołowiu, tzn. stanowiły słabszą osłonę przed promieniowaniem RTG, niż zakładał producent [9].

Trwają również badania nad zastosowaniem w osłonach chroniących przed promieniowaniem związków tlenków bizmutu zawieszonych w żywicy uretanowej. Według Kanga i wsp. [11] wprowadzenie takiego kompozytu może zwiększyć ochronność i elastyczność osłon osobistych niezawierających związków ołowiu. Autorzy szacują osłonność 1 warstwy takiej substancji na 58,5%, 49,9% i 43% dla wartości, odpowiednio, 60, 80 i 100 kVp.

Osłony osobiste – okulary, maski i czapki ołowiowe

Autorzy wielu artykułów naukowych podkreślali konieczność ochrony soczewek oczu przed promieniowaniem jonizującym oraz monitorowania dawki na soczewki oczu w ramach dozymetrii indywidualnej (głównie podczas zabiegów interwencyjnych) [12–24]. Opisywane we wspomnianych artykułach badania dotyczyły pomiaru ekspozycji na soczewki oczu, który wcześniej nie był prowadzony w ramach dozymetrii indywidualnej ze względu na wysoki, nieprzekraczany w miejscach pracy limit dawki (150 mSv/rok).

Zintensyfikowane próby szacowania poziomu ekspozycji, a także badania wpływu niskich dawek na rozwój zmętnień w soczewkach oczu u operatorów w radiologii zabiegowej oraz ustalanie metod optymalizacji ochrony radiologicznej soczewek oczu sięgają roku 2011, kiedy wprowadzono rekomendacje Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection) [25,26]. Wtedy też zakończył się europejski projekt ORAMED (Optimization of Radiation Protection of Medical Staff), w którego ramach oceniano poziomy ekspozycji m.in. na soczewki oczu u lekarzy wykonujących zabiegi z wykorzystaniem aparatów fluoroskopowych. W myśl powyższej rekomendacji dawka graniczna na soczewkę oka została zmieniona na 20 mSv/rok [26]. Warto jednak podkreślić, że samo zjawisko katarakty popromiennej ma niższy, niż wcześniej uważano, próg inicjacji, a nawet istnieją szacunki, że jest to zjawisko bezprogowe.

Na ryzyko przekroczenia nowego rocznego limitu dawki na soczewki oczu u kardiologów interwencyjnych wskazują również wyniki europejskiego badania EURALOC (*European Epidemiological Study On Radiation-Induced Lens Opacities Among Interventional*

Cardiologists) realizowanego w latach 2014–2016 [27]. Jego autorzy wykazali zależności pomiędzy rodzajami zabiegów kardiologii interwencyjnej, sposobem ich wykonywania (dostęp promieniowy lub udowy, czasy fluoroskopii, użyta aparatura) oraz wykorzystywaniem środków ochrony radiologicznej u operatorów z 10 państw Europy. Wyniki tego badania wskazują też, że używanie przez operatora (przy zabiegach z zakresu hemodynamiki) mocowanej do sufitu szyby ochronnej i okularów ze szkłem ołowiowym pozwala na nieprzekraczanie limitu 20 mSv/rok. Zauważono także stopniowy wzrost świadomości konieczności korzystania z osłon: 90% zabiegów hemodynamicznych wykonywano z szybą ochronną, a 40% – z szybą i okularami ze szkłem ołowiowym. Aż 7% takich zabiegów prowadzono jednak bez jakichkolwiek osłon.

Należy podkreślić, że typ zabiegu wpływa na dawkę zakumulowaną. Domienik-Andrzejewska i wsp. [27] stwierdzili, że niektóre dość rzadko wykonywane zabiegi wymagają dłuższych czasów fluoroskopii, z czego wynika zwiększenie dawki u operatora. Rekomenduje się zatem stosowanie osłon ochrony radiologicznej, by minimalizować dawkę akumulowaną w soczewce oka.

Także w Polsce na podstawie znowelizowanego prawa atomowego wdrażającego dyrektywę 2011/70/EURATOM zmniejszono wartość dawki granicznej dla soczewek oczu ze 150 mSv do bardziej restrykcyjnej granicy 20 mSv na rok kalendarzowy [28]. W związku z tym przeprowadzono pomiary wpływu okularów ołowiowych [29] i innych osłon, takich jak stałe, mocowane do sufitu przezroczyste szyby ołowiowe [30], które umożliwiają redukcję dawek otrzymywanych przez lekarzy kardiologów i radiologów zabiegowych. Okazało się, że okulary ze szkłem ołowiowym tłumią promieniowanie jonizujące dochodzące do soczewki oka o czynnik z przedziału 1,1–3,4.

Testowane są także inteligentne okulary Google Glass pozwalające na korzystanie z tzw. rzeczywistości rozszerzonej. Umożliwiają one wyświetlanie obrazu bezpośrednio przed oczami operatora, pozwalając uniknąć konieczności zmiany punktu obserwacji (np. odwracania głowy w stronę monitora diagnostycznego). W badaniach laboratoryjnych wykazano, że użycie takiej technologii w połączeniu ze szkłem ołowiowym umożliwia ok. 6-krotną redukcję dawki na soczewkę oka [31]. W tym samym badaniu stwierdzono także, że zależność kąta kierunku patrzenia od redukcji dawki otrzymanej na soczewkę oka wynosi 3,13–143,69% w stosunku do kierunku „na wprost” na źródło wiązki rozproszonej promieniowania RTG [31]. Co więcej, gdyby takie okulary były używane rutynowo, operator

mógłby dzięki nim mieć podgląd na obrazy operowanego organu wykonane nie tylko aparatem do fluoroskopii, ale także np. na zdjęcia zrobione uprzednio innymi technikami obrazowania, w tym tomografią komputerową czy aparatem ultrasonograficznym.

Prowadzone są również badania nad skutecznością różnego typu czapek ołowiowych/bezołowiowych i masek. Sugeruje się, że te pierwsze mogą osłaniać mózg, zaś te drugie (w porównaniu z okularami ze szkłem ołowiowym) mogą chronić nie tylko oczy, ale i całą twarz.

Osłony stałe – system Zero-Gravity i kabina tłumiąca promieniowanie

Jednym z urządzeń stosowanych w nowoczesnej ochronie radiologicznej jest system Zero-Gravity. Urządzenie to wykorzystuje układ prowadnic mocowanych na różnych wysięgnikach. Nie tylko chroni ono przed promieniowaniem RTG (pierwotnym i rozproszonym), ale także zmniejsza ryzyko wystąpienia u operatora powikłań w układach kostno-stawowym i mięśniowym. System Zero-Gravity umożliwia swobodne przemieszczanie się w środowisku operacyjnym i praktycznie nie obciąża szkieletu operatora. Osłony wykorzystywane w tym systemie obejmują płaszczyznę przednią o równoważniku 1 mm ołowiu oraz płaszczyzny boczne i zestaw szyb o równoważnikach 0,5 mm ołowiu. Waga urządzenia wynosi ok. 350 kg, jego prowadnica ma zasięg ok. 2 m, wysokość jest regulowana w zakresie ok. 40 cm, a ramię obrotowe pozwala na ustawienie zestawu pod kątem do 150°.

Etzel i wsp. [32] na podstawie pomiarów mocy dawek wykazali silną osłonność zestawu Zero-Gravity. Przykładowo dla wysokości 165 cm i ustawienia lampy w pozycji PA moce zmierzone komorą jonizacyjną wynosiły 119,3 $\mu\text{Sv/h}$ względem 6,3 $\mu\text{Sv/h}$ dla, odpowiednio, fartucha ołowiowego i systemu Zero-Gravity.

Innym sposobem redukcji dawki otrzymywanej przez operatora i odciążającym jego układy kostno-stawowy i mięśniowy jest kabina tłumiąca promieniowanie jonizujące Cathpax® (prod. LemerPax, USA). Stosuje się ją np. podczas operacji wątroby [33], a także w kardiologii zabiegowej, gdzie jej używanie umożliwia zredukowanie dawki na głowę operatora ze 102 μSv do ok. 2 μSv [34].

Inne osłony stałe

W wielu badaniach potwierdzono, że stosowanie osłon stałych w postaci kurtyn mocowanych przy stołach zabiegowych i ekranów montowanych do sufitu pozwala ograniczyć dawkę otrzymaną w wyniku działania

rozproszonego promieniowania RTG. Morishima i wsp. [35] przeprowadzili badanie kliniczne, w którym wykazali skuteczność stosowania osłon stałych i zmniejszonej liczby klatek na sekundę podczas obrazowania w trakcie kardiologicznych zabiegów resynchronizacji. Badacze stwierdzili, że używanie trybu 7,5 impulsów/s wiązało się z 24-procentową redukcją promieniowania rozproszonego w porównaniu z 10 impulsami/s. Wykazali oni także – uwzględniając skrajne przypadki – że wykorzystanie 7,5 impulsów/s i stosowanie osłon stałych pozwala na zmniejszenie promieniowania rozproszonego o 83,7% względem 10 impulsów/s i braku osłon.

Tzani i wsp. [36] także potwierdzili konieczność stosowania osłon stałych (w tym przypadku kurtyny chroniącej przed promieniowaniem jonizującym) przy procedurach PTA (*percutaneous transluminal angioplasty* – angioplastyka przezskórna) i EVAR (*endovascular aneurysm repair* – wewnątrznaczyniowa metoda leczenia tętniaków). Badacze stwierdzili, że odpowiednie użycie osłony może zmniejszać średnio o ok. 60% otrzymane przez operatora dawki na gonady, tarczycę czy soczewki oczu.

Wiedza dotycząca stosowania osłon stałych w radiologii interwencyjnej jest ciągle rozwijana, czemu towarzyszy opracowywanie prototypów nowych osłon, np. mobilnej osłony mocowanej do fluoroskopu [37]. Wykazano, że jej wykorzystanie podczas endoskopowej cholangiopankreatografii wstecznej o ok. 2/5 zmniejsza dawkę na ciało lekarza oraz marginalnie wpływa na dawkę otrzymywaną przez pielęgniarkę asystującą. Badacze sugerują, że osłonę tę można stosować podczas innych zabiegów z wykorzystaniem podglądu fluoroskopowego, oraz podkreślają, że jest ona lekka i prosta w obsłudze.

Interesującą formą osłony z ograniczenia osłon osobistych i stałych jest koc ołowiowy lub jego bezołowiowe odpowiedniki. W pilotażowym badaniu dotyczącym wykorzystania osłony bezołowiowej wykazano istotną statystycznie, 65-procentową redukcję dawki na całe ciało operatora oraz nieistotne statystycznie redukcje dawki na oczy i dłonie [38]. Grabowicz i wsp. przeprowadzili pomiary z wykorzystaniem koca ołowiowego umieszczanego na miednicy pacjenta podczas zabiegów z zakresu kardiologii interwencyjnej [39]. Okazało się, że wartości dawki na dłoń zależały od techniki pracy lekarza oraz położenia koca i pacjenta. Nie stwierdzono ponadto istotnego statystycznie zmniejszenia dawki na soczewki oczu lekarza ani pielęgniarki asystującej. Oprócz stosowania koca w celu obniżenia dawek

na soczewki oczu badacze sugerują również korzystanie z okularów ołowiowych i osłon mocowanych do sufitu [39].

Co więcej, Smith i wsp. [40] w badaniu laboratoryjnym dotyczącym plastyki zapadania się kręgow kręgosłupa, w której wykorzystuje się podgląd fluoroskopowy, mierzyli moc kermy w powietrzu i wykazali, że osłona na fantomie pacjenta nie wpływała istotnie na jej redukcję na wysokości głowy operatora. Badacze stwierdzili także, że największa redukcja mocy kermy w powietrzu występowała na wysokości fartucha ołowiowego (o 35,4% w odległości fantom-lekarz równej 0,5 m) [40].

Nowe-stare sposoby – redukcja dawki przez zwiększanie odległości

Zwiększanie odległości jest ważnym sposobem minimalizacji otrzymanej dawki, gdyż maleje ona wraz z kwadratem odległości. W niektórych sytuacjach klinicznych nie jest jednak możliwe skorzystanie z tego sposobu. Należą do nich zabiegi interwencyjne u dzieci, podczas których operator znajduje się blisko wiązki pierwotnej. Vano i wsp. [41] wykazali, że im większe dziecko (odwzorowane fantomem z pleksiglasu o grubości 4–20 cm) i wynikający z tego inny protokół akwizycji, tym bardziej rośnie wartość dawki uzyskanej z promieniowania rozproszonego, w skrajnych przypadkach – czyli między najmniejszym a największym dzieckiem – 92-krotnie.

Dawkę na dłonie można ograniczać, stosując specjalne rurki zwiększające odległość między miejscem wprowadzenia manipulatora a operatorem. Także w tym przypadku należy jednak wykorzystywać osłony osobiste i stałe oraz dozymetrię [42].

Roboty operacyjne

Systemy robot-operator pozwalają na redukcję do minimum dawki promieniowania RTG dla lekarza wykonującego zabieg. W czasie pracy lekarz znajduje się w bezpiecznej odległości, sterując zdalnie robotem, który ingeruje manipulatorami w tkanki pacjenta. Systemy takie są drogie, jednak oprócz minimalizacji dawki umożliwiają wykonywanie bardziej skomplikowanych zabiegów [43]. Przykładowo amerykański system CorPath 200 pozwala na wprowadzanie stentów i baloników, przez co jest użyteczny w przezskórnych zabiegach naczyniowych. Harrison i wsp. [43] w badaniu PRECISE (*Percutaneous Robotically Enhanced Coronary Intervention* – przezskórny zabieg naczyniowy wspomagany robotem) wykazali, że

99% ze 164 zabiegów nie wymagało dodatkowej ręcznej asysty, czyli zabiegi były prowadzone w pełni zdalnie.

Nowe-stare sposoby – redukcja czasu ekspozycji

Systemy redukcji dawki

wbudowane w urządzenie do fluoroskopii

Aparaty RTG do fluoroskopii stają się coraz nowocześniejsze. Szczególny nacisk kładzie się na polepszanie wydajności detektorów cyfrowych i systemy wspomaganie akwizycji. Plank i wsp. [44] przeprowadzili badanie, w którym porównywali zabiegi z zakresu kardiologii interwencyjnej, i stwierdzili, że wykorzystanie zoptymalizowanego programu do używania promieni RTG i nowoczesnego detektora cyfrowego umożliwiło redukcję średniego całkowitego iloczynu dawki na powierzchnię (*dose area product* – DAP) dla procedur o 74,7% [44].

Należy mieć świadomość, że w dobie rozwoju informatyki także w radiologii pojawia się tematyka sztucznej inteligencji. Trwają prace badawcze nad systemami optymalizacji dawki z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji, w tym retrospektywnie, tj. na podstawie protokołów z wcześniejszych badań rentgenowskich [45].

Ważny jest także sposób obrazowania samego aparatu RTG. Na rynku są dostępne aparaty umożliwiające fluoroskopię punktową, pozwalającą na kolimację wiązki w obszar kwadratu lub innego równoległoboku w każdym miejscu pola widzenia aparatu. Metoda różni się od kolimacji tradycyjnej, stosowanej w cyfrowej angiografii subtrakcyjnej, przede wszystkim redukcją DAP oraz tym, że fluoroskopia punktowa nie ogranicza ruchu w polu widzenia do obszaru centralnego. Morita i wsp. [46] wykazali, że fluoroskopia punktowa użyta wraz z DTDA (*dynamic trace digital angiography* – forma cyfrowej angiografii) pozwala na redukcję DAP z 29,1 Gy \times cm² do 5,3 Gy \times cm² [46].

Jednym ze sposobów redukcji dawki otrzymywanej przez personel, bezpośrednio związanym z aparaturą fluoroskopową, jest ułożenie lampy względem stołu zabiegowego. Użycie podczas zabiegów wszczepiania rozrusznika serca takiej konfiguracji, by lampa była umieszczona pod stołem zabiegowym i dodatkowo odgradzona osłoną w postaci np. kurtyny tłumiącej promieniowanie RTG, pozwala na istotną statystycznie redukcję dawki dla soczewki oka prawego (stosunek średniej dawki dla ułożenia lampy nad i pod stołem wynosił 4,1), palców lewej dłoni (stosunek – 4,8) i lewego nadgarstka (stosunek – 3). Zaobserwowano tu jednak wzrost dawki na nogi, która, jak sugerują autorzy,

może być zmniejszona przez stosowanie kurtyny ołowiowej [47].

Dozymetria czasu rzeczywistego

Oprócz obowiązkowej dozymetrii pozwalającej osobom pracującym w narażeniu zbierać informacje o sumarycznej dawce, którą otrzymali w czasie działalności zawodowej, a także o wartościach dawek otrzymywanych w poszczególnych okresach pomiarowych lub o przekroczeniu wartości dawek granicznych, coraz częściej stosuje się bezprzewodowe systemy oceny narażenia czasu rzeczywistego. Wykorzystuje się do tego dozometr elektroniczny, który przesyła dane do urządzenia zbierającego dane i wyświetlającego aktualną szacunkową wartość dawki promieniowania RTG podczas zabiegu. Tego typu analiza rozkładu dawki i jej mocy w środowisku interwencyjnym pozwala na optymalizację pracy oraz może redukować dawkę otrzymywaną przez personel podczas zabiegów [48–50].

Baumann i wsp. [48], korzystając z dozymetrii czasu rzeczywistego, wykazali średnią redukcję dawki na czas obrazowania fluoroskopowego z 42,79 μ Sv/min do 19,81 μ Sv/min. W innym badaniu stwierdzono zależność dawki od typu procedury (ten sam dozometr elektroniczny wykazał dla arteriografii kończyn dolnych dawkę 0,16 mSv, a dla arteriografii naczyń mózgowych – 3,35 mSv) [49]. Dozymetria czasu rzeczywistego umożliwia szacowanie ryzyka podczas zabiegu z wykorzystaniem fluoroskopii oraz identyfikację procedur, w trakcie których należy stosować wszystkie dostępne środki ochrony przed promieniowaniem [50].

Ochrona radiologiczna to także świadomość

Fanelli i Dake [51] na przykładzie operacji tętniaków aorty podsumowali kluczowe elementy bezpiecznej praktyki lekarskiej w radiologii zabiegowej. Są nimi:

- racjonalna minimalizacja czasu fluoroskopii i liczby klatek na sekundę;
- wykorzystywanie osłon redukujących dawkę u pacjenta;
- stosowanie odpowiedniej geometrii lampy RTG – wzmacniacz obrazu (lampa pod stołem zabiegowym, a wzmacniacz obrazu nad nim) i lampa RTG – pacjent [detektor jak najbliżej płaszczyzny pacjenta, a pacjent jak najdalej od źródła promieniowania RTG (w osi lampy)];
- stosowanie kolimacji wiązki;
- korzystanie ze wszystkich dostępnych informacji pozwalających bezpiecznie zaplanować zabieg pod względem ochrony radiologicznej;

- usytuowanie operatora podczas zabiegu w strefie o najniższej ilości promieniowania rozproszonego;
- stosowanie osłon;
- stosowanie odpowiedniego oprzyrządowania w obrazowaniu fluoroskopowym (zgodnego ze standardami Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej);
- przejście odpowiednich szkoleń z zakresu ochrony radiologicznej (w przypadku Polski – zdanie egzaminu z ochrony radiologicznej pacjenta);
- właściwe stosowanie dozymetrów (by być świadomym swojego narażenia i móc monitorować dawkę życiową).

Ważne są zatem nieustanna nauka, świadomość i dzielenie się wiedzą z zakresu ochrony radiologicznej. Jedną z dróg przekazywania wiedzy w tym zakresie staje się internet. Praktycy i osoby powiązane z radiologią od pewnego czasu zaczynają odkrywać potęgę mediów społecznościowych mimo obaw związanych z ryzykiem m.in. braku bezpieczeństwa danych lub mieszania się spraw służbowych z prywatnymi w takich środkach przekazu. Przykładem wykorzystania internetu do propagacji wiedzy i zrzeszania osób jest facebookowy fanpage „myESR” prowadzony przez europejskie stowarzyszenie zrzeszające radiologów – European Society of Radiology (w 2015 r. miał on ok. 157 tys. obserwujących, a na koniec 2019 r. było ich blisko 170 tys.).

Wykorzystanie w radiologii znalazł również tak nietypowy dla branży medycznej serwis internetowy, jakim jest Instagram. Profil na nim prowadzi m.in. radiolodzy z Chicago, którzy przedstawiają tam ciekawe przypadki i mają ok. 1700 obserwujących [52]. Często pojawiającym się w artykułach pomysłem jest tworzenie kwestionariuszy, które mają na celu orientację i szacowanie stanu wiedzy osób pracujących w narażeniu na promieniowanie RTG w środowisku interwencyjnym [53].

Teoria to jedno, a praktyka to drugie. Lepiej wyszkolony operator z dłuższą praktyką często potrafi wykonać zabieg w czasie krótszym niż lekarz z krótszym stażem lub gorzej wyszkolony. Mogą o tym świadczyć wyniki badania, w którym stwierdzono, że osoby uczestniczące w szkoleniu obejmującym wirtualne operacje wykonywały zabieg szybciej, krócej używały aparatu do fluoroskopii oraz stosowały mniej kontrastu w porównaniu z osobami nieuczestniczącymi w szkoleniu (w obu grupach, badanej i porównawczej, oceniano przeprowadzenie 40 zabiegów) [54].

Należy także mieć świadomość, że wraz ze wzrostem bezpieczeństwa zespołu medycznego pracującego

w narażeniu na promieniowanie jonizujące rośnie ryzyko zwiększenia dawki otrzymanej przez pacjenta. W prowadzonych we Francji badaniach na ten temat wykazano, że dawki te zależą od typu procedury, praktyki i – osobniczo – od pacjenta [55]. W przypadku redukcji narażenia pacjenta ważne jest także zarządzanie jakością, czyli stosowanie procedur bezpieczeństwa i zapewnienia jakości [56].

Redukcja dawki zarówno u lekarza, jak i u pacjenta jest w centrum zainteresowania ośrodków badawczych, w tym Cardiovascular Institute w Rhode Island Hospital, gdzie stabelaryzowano metody optymalizacji zabiegów w kardiologii zabiegowej pod względem minimalizacji dawki [57].

Także w Polsce, m.in. w Zakładzie Ochrony Radiologicznej Instytutu Medycyny Pracy (IMP) w Łodzi, prowadzone są badania i analizy dawek promieniowania RTG otrzymywanych przez personel medyczny. Przykładem może być retrospektywna analiza Domienik-Andrzejewskiej i wsp. [58], w której wyznaczono współczynniki korelacji między indywidualnym równoważnikiem dawki na całe ciało Hp(10) a indywidualnym równoważnikiem dawki na soczewkę oczu Hp(3) do oszacowania dawek skumulowanych w soczewkach oczu u lekarzy kardiologów interwencyjnych znajdujących się w bazie dozymetrii indywidualnej IMP [58].

Inne metody podglądu a redukcja dawki

Wśród nowych metod podglądu zabiegowego w fazie badań i porównań jest wykorzystanie magnetycznego rezonansu jądrowego w obrazowaniu MRI (*magnetic resonance imaging*) [59]. Jest to sposób obrazowania wykorzystujący zachowania jąder atomów, m.in. wodoru zawartego w tkankach. Jądra atomowe, znajdując się w silnym polu magnetycznym magnezu stałego, po chwilowym wzbudzeniu falą o częstotliwości radiowej same emitują wskutek procesu relaksacji falę wtórną o tej samej częstotliwości, którą można zarejestrować. Zjawisko to pozwala na oszacowanie występowania danego pierwiastka, a zatem gęstości tkanek i budowy narządów. Samo zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego jest skomplikowane (nie tylko na poziomie mechaniki kwantowej, ale i w przybliżeniu klasycznym), zatem w niniejszym artykule zostało ono opisane w sposób pobieżny.

Wykorzystanie tego typu obrazowania nie wykazuje wysokiego ryzyka indukcji chorób, zatem wydaje się ono bezpieczniejsze niż techniki, w których stosuje się promieniowanie jonizujące.

WNIOSKI

Następstwa stosowania promieniowania RTG w medycynie mogą być zarówno pozytywne, jak i negatywne. Promieniowanie jonizujące wykorzystywane odpowiednio oraz zgodnie z przepisami, normami i ze zdrowym rozsądkiem (stosowanie jak najlepszego zestawu osłon, wybieranie optymalnego scenariusza zabiegu oraz korzystanie z obowiązkowej dozymetrii osób pracujących w narażeniu na promieniowanie) może przynieść więcej korzyści niż szkód dla zarówno personelu medycznego, jak i pacjentów. Co ważne, aparatura rentgenowska musi przechodzić regularne testy i kontrole określające jej bezpieczeństwo i jakość obrazowania.

Ważna jest także świadomość ryzyka wiążącego się z wykorzystywaniem promieniowania RTG. Pociągające jest to, że rozwój technologiczny aparatury rentgenowskiej może także powodować zmniejszenie dawki uzyskanej przez zarówno lekarza, jak i pacjenta. Ponadto, co starano się uzasadnić w niniejszym artykule, 3 podstawowe metody redukcji dawki – czas, odległość, osłony – są stale rozwijane, a prace badawcze skutkują powstawaniem nowocześniejszych urządzeń bazujących na powyższych trzech metodach.

Niezależnie od typu i nowoczesności stosowanej metody każdy członek zespołu znajdującego się w środowisku zabiegowym, w którym wykorzystywane jest promieniowanie jonizujące, musi jednak sam dbać o własne bezpieczeństwo. Powinien stosować wszelkie możliwe i dostępne formy osłony oraz nosić dozymetr, by móc oszacować narażenie związane z ekspozycją na promieniowanie jonizujące. Ponadto w świetle polskiego prawa regularnie prowadzona dozymetria zlecana laboratorium, które są akredytowane przez Polskie Centrum Akredytacji, jest podstawą do stwierdzenia wystąpienia choroby zawodowej, której przyczyną mogła być ekspozycja na promieniowanie RTG.

PODZIĘKOWANIA

Autor chciałby serdecznie podziękować dr Joannie Domienik-Andrzejewskiej i prof. dr. hab. Markowi Zmyśloneemu za motywację do napisania niniejszego artykułu.

PIŚMIENNICTWO

1. Hausle U., Czerwinski R., Brix G.: Radiation exposure of medical staff from interventional x-ray procedures: a mul-

2. Lakhwani O.P., Dalal V., Jindal M., Nagala A.: Radiation protection and standardization. *J. Clin. Orthop. Trauma* 2019;10:738–743, <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.08.010>
3. Falco D.M., Masala S., Stefanini M., Bagala P., Morosetti D., Calabria E. i wsp.: Effective-dose estimation in interventional radiological procedures. *Radiol. Phys. Technol.* 2018; 11:149–155, <https://doi.org/10.1007/s12194-018-0446-5>
4. Siiskonen T., Ciraj-Bjelac O., Dabin J., Domienik-Andrzejewska J., Farah J., Fernandez J.M. i wsp.: Establishing the European diagnostics reference levels for interventional cardiology. *Phys. Med.* 2018;54:42–48, <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.09.012>
5. Routledge H., Sastry S.: Radial versus femoral access for acute coronary syndromes. *Curr. Cardiol. Rep.* 2015; 17:117, <https://doi.org/10.1007/s11886-015-0676-7>
6. Ruiz-Cruces R., Vano E., Carrera-Magarino F., Moreno-Rodriguez F., Solero-Cantos M.M., Canis-Lopez M. i wsp.: Diagnostic reference levels and complexity indices in interventional radiology: a national programme. *Eur. Radiol.* 2016;26:4268–4276, <https://doi.org/10.1007/s00330-016-4334-2>
7. Domienik J., Brodecki M., Rusicka D.: A study of the dose distribution in the region of the eye lens and extremities for staff working in interventional cardiology. *Radiat. Meas.* 2012;47:130–138, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.12.004>
8. Maddar R.D., LaCombe A., VanOosterhout S., Mulder A., Elmore M., Parker J.L.: Radiation Exposure among scrub technologists and nurse circulators during cardiac catheterization. *JACC Cardiovasc. Intervent.* 2018;11:206–212, <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2017.07.026>
9. Lu H., Boyd C., Dawson J.: Lightweight Lead Aprons: The Emperor's New Clothes In the Angiography Suite? *Eur. Vasc. Endovasc. Surg.* 2019;57:730–739, <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2019.01.03>
10. Bartal G., Sailer M.A., Vano E.: Should we keep the lead in the aprons? *Tech. Vasc. Intervent. Rad.* 2018;21:2–6, <https://doi.org/10.1033/j.tvir.2017.12.002>
11. Kang J.H., Oh S.H., Oh J.-I., Kim S.-H., Choi Y.-S., Hwang E.-H.: Protection evaluation of non-lead radiation shielding fabric: preliminary exposure-dose study. *Oral Radiol.* 2019;35: 224–229, <https://doi.org/10.1007/s11282-018-0338-8>
12. Vaes B., Keer K.V., Struelens L., Schoonjans W., Nijs I., Vandevenne J. i wsp.: Eye lens dosimetry in anesthesiology: a prospective study. *J. Clin. Monit. Comput.* 2016;31: 303–308, <https://doi.org/10.1007/s10877-016-9857-1>
13. Van Rooijen B.D., de Haan M.W., Das M., Arnoldussen C.W.K.P., de Graaf R., van Zwam W.H. i wsp.:
ticenter study. *Eur. Radiol.* 2009;19:2000–2008, <https://doi.org/10.1007/s00330-009-1388-4>

- Efficacy of Radiation safety glasses in interventional radiology. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2014;37:1149–1155, <https://doi.org/10.1007/s00270-013-0766-0>
14. Krisanachinuda A., Srimahachota S., Matsubara K.: The current status of eye lens dose measurement in interventional cardiology personnel in Thailand. *Radiol. Phys. Technol.* 2017;10:142–147, <https://doi.org/10.1007/s12194-017-0403-8>
 15. Machan L.: The eyes have it. *Tech. Vasc. Intervent. Radiol.* 2018;21:21–25, <https://doi.org/10.1053/j.tvir.2017.12.003>
 16. Cornacchia S., Errico R., La T.L., Maldera A., Simeone G., Fusco V. i wsp.: The new lens dose limit: implication for occupational radiation protection. *La Radiol. Med.* 2019;124:728–735, <https://doi.org/10.1007/s11547-019-01027-7>
 17. Dalah Z.E., Mahdi O., Elshami W., Abuzaid M.M., David L.R., Mira O.A.: Occupational doses to cardiologists performing fluoroscopically-guided procedures. *Radiat. Phys. Chem.* 2018;153:21–26, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.ac.ae>
 18. Mattar E., Alsafi K., Sulieman A., Suliman I.I.: Occupational exposure of the operator eye lens in digital coronary angiography and interventions. *Radiat. Phys. Chem.* 2019;165:108400, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108.400>
 19. Thomas Rohit P., Grau M., Eldergash O., Kowlad T., Schnabel J., Szczechowicz M. i wsp.: Will X-ray safety glasses become mandatory for radiological vascular interventions? *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2018;41:1074–1080, <https://doi.org/10.1007/s00270-018-1960-x>
 20. Coppeta L., Pietroiusti A., Neri A., Spataro A., De Angelis E., Perrone S.: Risk of radiation-induced lens opacities among surgeons and interventional medical staff. *Radio. Phys. Technol.* 2019;12:26–29, <https://doi.org/10.1007/s12194-018-0487-9>
 21. Marcantonini M., Chiappinello A., Beneventi S., Reggioli V., Dipilato A.C., Fulcheri C.P.L.: Evaluation of equivalent dose to eye lens through dose equivalent Hp(3). *Phys. Med.* 2019;64:29–32, <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.04.030>
 22. Hoedlmoser H., Greiter M., Bandalò V., Mende E., Bronner J., Keinau P.: New eye lens dosimeters for integration in radiation protection glasses. *Rad. Meas.* 2019;125:106–115, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.05.002>
 23. Medici S., Pitzschke A., Cherbuin N., Boldini M., Sans-Merce M., Damet J.: Eye lens radiation exposure of the medical staff performing interventional urology procedures with an over-couch X-ray tube. *Phys. Med.* 2017;43:140–147, <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.11.002>
 24. Seals K.F., Lee E.W., Cagnon C.H., Al-Hakim R.A., Kee S.T.: Radiation-Induced Cataractogenesis: A critical literature Review for the Interventional Radiologist. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2016;(39):151–160, <https://doi.org/10.1007/s00270-015-1207-z>
 25. International Commission on Radiological Protection: Statement on Tissue Reactions. Approved by the Commission on April 21, 2011. Commission, 2011
 26. 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. *Rad. Meas.* 2011;46:1203–1209, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.06.034>
 27. Domienik-Andrzejewska J., Ciraj-Bjelac O., Panagiotis A., Covens P., Dragusing O., Jacob S.: Past and present work practices of European interventional cardiologists of the eye lens-results of the EURALOC study. *J. Radiol. Prot.* 2018;38:934–950, <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aac64b>
 28. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe. *DzU z 2019 r., poz. 1792, DzU z 2020 r., poz. 284*
 29. Domienik J., Brodecki M.: The effectiveness of lead glasses in reducing the doses to eye lenses during cardiac implantation procedures performed using x-ray tubes above the patient table. *J. Radiol. Prot.* 2016;36:19–25, <https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/2/N19>
 30. Domienik J., Bissinger A., Grabowicz W., Jankowski Ł., Kręcki R., Makowski M. i wsp.: The impact of various protective tools on the dose reduction in the eye lens in an interventional cardiology – clinical study. *J. Radiol. Prot.* 2016;36:309–318, <https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/2/309>
 31. Dorey S., Gray L., Tootell A., Higgins R., Al-Islam S., Baxter H. i wsp.: Radiation protection value to the operator from augmented reality smart glasses in interventional fluoroscopy procedures using phantoms. *Radiography* 2019;25(4):301–307, <https://doi.org/10.1016/j.radi.2019.02.008>
 32. Etzel R., König M.A., Keil B., Fiebich M., Mahnken H.A.: Effectiveness of a new radiation protection system in the interventional radiology setting. *Eur. J. Radiol.* 2018;106:56–61, <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.07.006>
 33. Maleux G., Bergans N., Bosmans H., Bogaerts R.: Radiation protection cabin for catheter-directed liver interventions: operator dose assessment. *Radiat. Prot. Dosimetry* 2016;170(1–4):274–278, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv438>
 34. Dragusin O., Weerasooriya R., Jais P., Hoicini M., Ector J., Takahashi Y. i wsp.: Evaluation of a radiation protection cabin for invasive electrophysiological procedures. *Eur.*

- Heart J. 2007;28(2):183–189, <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehl420>
35. Morishima Y., Chida K., Katahir Y.I.: The effectiveness of additional lead-shielding drape and low pulse rate fluoroscopy in protecting staff from scatter radiation during cardiac resynchronization therapy (CRT). *Jpn. J. Radiol.* 2019;37:95–101, <https://doi.org/10.1007/s116054-018-0783-7>
36. Tzanis E., Tsetis D., Kehagias E., Ioannou C.V., Damilakis J.: Occupational exposure during endovascular aneurysm repair (EVAR) and aortoiliac percutaneous transluminal angioplasty (PTA). *La Radiol. Med.* 2019;124:539–545, <https://doi.org/10.1007/s11547-018-00985-8>
37. Mori H., Koshida K., Ishigamori O., Matsubara K.: A novel removable shield attached to C-arm units against scattered X-rays from a patient's side. *Eur. Radiol.* 2014;(24):1794–1799, <https://doi.org/10.1007/s003300-014-3186-x>
38. Power S., Mirza M., Thakorlal A., Ganai B., Gavagan L.D., Given M.F. i wsp.: Efficacy of a radiation absorbing shield in reducing dose to interventionalist during peripheral endovascular procedures: A single centre pilot study. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2014;(38):573–578, <https://doi.org/10.1007/s00270-014-0997-8>
39. Grabowicz W., Domienik-Andrzejewska J., Masiarek K., Górnik T., Grycewicz T., Brodecki M.: Effectiveness of pelvic lead blanket to reduce the doses to eye and hands of interventional cardiologists and assistant nurses. *J. Radiol. Prot.* 2017;37(3):715–727, <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa7a70>
40. Smith J.R., Marsh R.M., Silosky M.S.: Is lead shielding of patients necessary during fluoroscopic procedures? A study based on kyphoplasty. *Skeletal. Radiol.* 2018;47:37–43, <https://doi.org/10.1007/s00256-017-2756-9>
41. Vano E., Ubeda C., Leyton F., Miranda P., Gonzalez L.: Staff Radiation doses in interventional cardiology: correlation with patient exposure. *Pediatr. Cardiol.* 2009;30:409–413, <https://doi.org/10.1007/s00246-008-9375-0>
42. Dixon S., Shick D., Harper J.: Radiation Protection methods for the interventionalist's hands: use of extension tube. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2015;38:463–469, <https://doi.org/10.1007/s00270-014-0893-2>
43. Harrison J., Ang L., Naghi J., Behnamfar O., Pourjabbar A., Patel Mitul P. i wsp.: Robotically-assisted percutaneous coronary intervention: Reasons for partial manual assistance or manual conversion. *Card. Revasc. Med.* 2018;19:526–531, <https://doi.org/10.1016/j.carrev.2017.11.003>
44. Plank F., Stowasser B., Till D., Schgor W., Dichtl W., Hintringer F. i wsp.: Reduction of fluoroscopy dose for cardiac electrophysiology procedures: A feasibility and safety study. *Eur. J. Radiol.* 2019;110:105–111, <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.11.2019>
45. European Society of Radiology Statement: What the radiologist should know about artificial intelligence – an ESR white paper. *Eur. Soc. Radiol.* 2019;10:44, <https://doi.org/10.1186/s13244-019-0738-2>
46. Morita S., Endo K., Suzaki S., Ishizaki U., Yamazaki H., Nishina Y. i wsp.: Reduction of radiation exposure using dynamic trace digital angiography and spot fluoroscopy during adrenal venous sampling. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2017;40:697–703, <https://doi.org/10.1007/s00270-017-1567-7>
47. Domienik J., Bissinger A., Zmysłony M.: The impact of x-ray tube configuration on the eye lens and extremity doses received by cardiologists in electrophysiology room. *J. Radiol. Prot.* 2014;34(4):N73–79, <https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/4/N73>
48. Baumann F., Katzen B.T., Carelsen B., Diehm N., Benati J.F., Pena C.S.: The effect of realtime monitoring on dose exposure to staff within an interventional radiology setting. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2015;38:1105–1111, <https://doi.org/10.1007/s00270-015-1075-6>
49. Sanchez R., Vano E., Fernandez J.M., Gallego J.J.: Staff radiation doses in a real-time display inside the angiography room. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2010;33:1210–1214, <https://doi.org/10.1007/s00270-010-9945-4>
50. Sailer A.M., Paulis L., Vergoossen L., Kovac A.O., Wijnhoven G., Schurink G.W.H.: Real-time patient and staff radiation dose monitoring in IR practice. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2017;40:421–429, <https://doi.org/10.1007/s00270-016-1526-8>
51. Fanelli F., Dake M.D.: Standard of practice for the endovascular treatment of thoracic aortic aneurysm and type B dissections. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2009;32:849–860, <https://doi.org/10.1007/s00270-009-9668-6>
52. Ranschaert E.R., van Ooijen P.M.A., Lee S., Ratib O., Parizel P.M.: Social media for radiologists: an introduction. *Insights Imaging* 2015;6:741–752, <https://doi.org/10.1007/s13244-015-0430-0>
53. Lee A.M., Lee M.J.: Radiation safety awareness among medical interns: are EU guidelines being implemented? *Ir. J. Med. Sci.* 2017;186:547–553, <https://doi.org/10.1007/s11845-016-1530-7>
54. Popovic B., Pinelli S., Albuissou E., Metzendorf P.A., Morer B., Tran N. i wsp.: The simulation training in coronary angiography and its impact on real life conduct in the catheterization laboratory. *Am. J. Cardiol.* 2019;123(8):1208–1213, <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2019.01.032>
55. Etard C., Bigand E., Salvat C., Vidal V., Beregi J.P., Hornbeck A. i wsp.: Patient dose in interventional radio-

- logy: a multicentre study of the most frequent procedures in France. *Eur. Radiol.* 2017;27:4281–4290, <https://doi.org/10.1007/s00330-017-4780-5>
56. Forcella R., Jazmati T., Kumar A., Abujudeh H.: Quality assurance in interventional radiology: intra-procedural care. *Curr. Radiol. Rep.* 2019;7:1, <https://doi.org/10.1007/s40134-019-0310-3>
57. Goldsweig A.M., Abbott J.D., Aronow H.D.: Physician and patient radiation exposure during endovascular procedures. *Curr. Treat Options Cardio. Med.* 2017;19:10, <https://doi.org/10.1007/s11936-017-0507-9>
58. Domienik-Andrzejewska J., Brodecki M., Zmysłony M.: Correlation of eye lens doses and personal dose equivalent measured on the arm of interventional cardiologists for a retrospective assessment of doses to operators' eye lens. *Radiat. Prot. Dosim.* 2020;189(3):271–278, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa039>
59. Fernandez-Gutierrez F., Martinez S., Rube M.A., Cox B.F., Fatahi M., Scott-Brown K.C. i wsp.: Comparative ergonomic workflow and user experience analysis of MRI versus fluoroscopy-guided vascular interventions: an iliac angioplasty exemplar case study. *Im. J. CARS* 2015;10:1639–1650, <https://doi.org/10.1007/s11548-015-1152-y>