

# DOZYMETRIA INDYWIDUALNA JAKO ELEMENT PROFILAKTYKI ZDROWOTNEJ PRACOWNIKÓW NARAŻONYCH NA PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

INDIVIDUAL DOSIMETRY AS AN ELEMENT  
OF HEALTH PREVENTION FOR EMPLOYEES EXPOSED TO IONIZING RADIATION

Joanna Domienik-Andrzejewska<sup>1</sup>, Marta Wiszniewska<sup>2</sup>

Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland

<sup>1</sup> Zakład Ochrony Radiologicznej / Radiation Protection Department

<sup>2</sup> Klinika Chorób Zawodowych i Zdrowia Środowiskowego / Clinic of Occupational Diseases and Environmental Health

## STRESZCZENIE

Przedstawiono zgodne z rekomendacjami Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej współczesne standardy ochrony radiologicznej i ich ewolucję na przestrzeni lat na podstawie nowej wiedzy na temat skutków biologicznych działania promieniowania jonizującego oraz zmieniający się stosunek do akceptowanego ryzyka. W pracy w sposób szczególnie uwzględniono rolę zasady limitowania dawek i pomiarów dawek indywidualnych w działaniach ukierunkowanych na profilaktykę zdrowotną indywidualnych osób narażonych zawodowo na promieniowanie jonizujące. Med Pr Work Health Saf. 2023;74(6):527–39.

**Słowa kluczowe:** dozymetria indywidualna, monitoring dawek, profilaktyka, skutki stochastyczne, skutki deterministyczne, choroby zawodowe

## ABSTRACT

The paper presents the current radiation protection standards, in line with the recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP), and their evolution over the years based on new knowledge about the biological effects of ionizing radiation and the changing attitude of people to the accepted risk. The work takes into account in particular the role of the dose limit principle and individual dose measurements in activities aimed at health prevention of individual people occupationally exposed to ionizing radiation. Med Pr Work Health Saf. 2023;74(6):527–39.

**Key words:** individual dosimetry, dose monitoring, prevention, stochastic effects, deterministic effects, occupational diseases

Autorka do korespondencji / Corresponding author: Joanna Domienik-Andrzejewska, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Zakład Ochrony Radiologicznej, ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: joanna.domienik@imp.lodz.pl  
Nadesłano: 6 listopada 2023, zatwierdzono: 13 grudnia 2023

## WSTĘP

### Rys historyczny

Obecnie powszechnie wiadomo, że promieniowanie jonizujące jest czynnikiem ryzyka dla zdrowia człowieka. Znajduje się ono na liście czynników rakotwórczych Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (International Agency for Research on Cancer – IARC) – wyspecjalizowanej agencji Światowej Organizacji Zdrowia (World Health Organization – WHO) – wśród głównych czynników fizycznych wywołujących nowotwory [1].

Nie było to jednak tak oczywiste zaraz po odkryciu promieniowania rentgenowskiego (RTG) przez Roentgena w roku 1895 ani naturalnej promieniotwórczości przez

Becquerela rok później, kiedy zaczęto szeroko wykorzystywać zarówno urządzenia RTG, jak i materiały promieniotwórcze w fizyce, chemii, a w szczególności w medycynie. Stosunkowo szybko zaobserwowano jednak, że promieniowanie jonizujące może wywoływać widoczne skutki zdrowotne, takie jak rumień skóry (*radiodermatitis*) czy zmętnienie soczewek, które w najostrzejszej postaci może przybrać formę ślepoty. Przy początkowym braku instrumentów pomiarowych pozwalających na ilościową ocenę ekspozycji właśnie tę jakościową obserwację wykorzystywano przy kalibracji pierwszych aparatów RTG [2]. W wyniku rosnącego zastosowania promieniowania jonizującego i niewiedzy dotyczącej jego możliwych skutków biologicznych pojawiały się przypadki osób (naukowców,

lekarzy, pacjentów), u których obserwowano stany zapalne skóry wywołane promieniowaniem jonizującym. Już miesiąc po odkryciu promieniowania RTG opublikowano pierwszy raport dotyczący indukowanych nim poważnych stanów zapalnych skóry związanych z ekspozycjami na wysokie dawki lub moce dawek [2].

Początkowo ochrona pracowników przed skutkami promieniowania – zgodnie ze stanem ówczesnej wiedzy – mogła polegać (i w praktyce polegała) na zapobieganiu pierwszym objawom widocznym na skórze. Mimo to pierwszy dzienny limit dawki (10 rad/dzień, tj. 100 mGy/dzień) wprowadzony w 1902 r. oparto nie na jakościowej obserwacji, a na najmniejszej ilości promieniowania jonizującego, które może wywołać zaczerwienie na płycie fotograficznej [2].

Dzisiaj wiadomo, że limit ten nie uchroniłby przed negatywnymi dla skóry skutkami promieniowania – dawka progowa na wystąpienie teleangiektazji i późnej martwicy skóry po 5 latach od ekspozycji (wynosząca 30–40 Gy [3]) została przekroczona po ok. 1,5 roku pracy przy założeniu obciążenia pracownika najwyższą dopuszczalną dawką każdego dnia.

Wraz z publikacjami dotyczącymi wyników badań na zwierzętach już w 1903 r. pojawiły się dowody wskazujące, że skutki działania promieniowania jonizującego na organizmy żywe obejmują znacznie szerszy zakres zmian chorobowych niż zmiany skórne i że promieniowanie to może również indukować nowotwory, a nawet choroby dziedziczne.

Pojawienie się pierwszego nowotworu wywołanego promieniowaniem w owrzodzonym obszarze skóry u ludzi odnotowano w 1902 r. [4], a w 1911 r. opublikowano pierwszy raport dotyczący występowania białaczek u 4 osób po długotrwałej ekspozycji na promieniowanie jonizujące [5].

Zanim jednak była dostępna pełniejsza wiedza na temat możliwych skutków zdrowotnych działania promieniowania jonizującego na organizm człowieka, której dostarczyły badania epidemiologiczne osób ocalałych po wybuchu bomby atomowej (kohorta *Life Span Study* – LSS), sformułowano jeszcze kilka koncepcji limitów dawek ograniczających ekspozycję osób zawodowo narażonych na promieniowanie celem ochrony ich zdrowia, w tym:

- dawkę tolerancyjną zaproponowaną przez Mutschellera w 1924 r.,
- maksymalną dawkę dopuszczalną (*permissible dose*) w 1955 r.

Były one oparte raczej na ocenach i sądach o braku obserwowalnych szkodliwych skutków zdrowotnych niż

na ilościowej ocenie zmian biologicznych oraz na założeniu, że istnieje pewien poziom ekspozycji, który jest bezpieczny.

### **Skutki biologiczne promieniowania jonizującego na podstawie danych epidemiologicznych – co wiemy dzisiaj**

Najważniejsze źródła danych epidemiologicznych  
Podstawowym problemem przy badaniu skutków działania promieniowania jonizującego na zdrowie człowieka jest to, że obraz kliniczny zmian nim wywołanych jest nie do odróżnienia od obrazu choroby wywołanego innymi czynnikami. Z tego powodu w ocenie wpływu promieniowania jonizującego porównuje się 2 grupy, które charakteryzują się różnym poziomem ekspozycji.

Największym źródłem danych ilościowych na temat skutków biologicznych działania promieniowania na zdrowie człowieka były wyniki badań kohorty LSS wraz z późniejszymi badaniami obserwacyjnymi [6–9]. Kohortę LSS utworzono na podstawie spisu powszechnego przeprowadzonego w latach 50. XX w. w Hiroszimie i Nagasaki – miastach dotkniętych wybuchem bomby atomowej, odpowiednio, 6 i 9 sierpnia 1945 r.

Badania te miały jakościową przewagę nad innymi badaniami epidemiologicznymi, gdyż kohorta LSS obejmowała dużą populację osób w każdym wieku (włączając w to znajdujących się w czasie wybuchu w łonie matki) i obojga płci, a więc ich wyniki mogły być zastosowane do oceny ryzyka dla całej populacji. Utworzono także kohortę dzieci, które zostały poczęte po bombardowaniu. Inną zaletą tych badań był szeroki zakres retrospektywnie oszacowanych dawek, od niskich, tak jak poziom promieniowania tła, do kilku grejów.

Należy jednak pamiętać, że w przypadku badań kohorty LSS dane dotyczą pojedynczej ekspozycji całego ciała, podczas gdy w badaniach dotyczących ekspozycji medycznej czy zawodowej odnoszą się one najczęściej do wielokrotnej lub ciągłej ekspozycji miejscowej. Co więcej, ich wadą jest też udział w ekspozycji składowej neutronowej. Z kolei moc statystyczna tych ostatnich badań, a w szczególności dotyczących ekspozycji zawodowej, ze względu na poziom obserwowanych dawek (często nieprzekraczających zakresu niskich dawek), jest niestety mała. Z tych powodów stanowią one pewnego rodzaju uzupełnienie badań kohorty LSS, które są wciąż podstawowym źródłem danych o skutkach narażenia na promieniowanie jonizujące.

Istotne i warte odnotowania jest również to, że badania oparte na kohorcie LSS dostarczyły nie tylko danych

o zachorowalności (jak inne badania), ale także o umiarkowości na nowotwory indukowane promieniowaniem jonizującym ze względu na długi okres monitorowania kohorty od momentu ekspozycji (w ramach badań obserwacyjnych).

#### Skutki deterministyczne

Wnioski z prowadzonych badań pokazały, że pierwsze zmiany skórne, które obserwowano u osób pracujących z promieniowaniem zaraz po odkryciach Roentgena i Becquerela, występowały po przekroczeniu pewnych poziomów dawek zwanych dawkami progowymi i były tym intensywniejsze, im poziomy tych dawek były wyższe. Skutki biologiczne promieniowania jonizującego, które charakteryzowały się takimi cechami, nazwano deterministycznymi. Oprócz wspomnianych zmian skórnych zalicza się do nich również zaćmę, choroby mózgowo- i sercowo-naczyniowe (*cardiovascular diseases* – CVD), a także ostrą chorobę popromienną (OChP) lub przewlekłą chorobę popromienną (PChP). Skutki te mogą charakteryzować się wczesnymi lub późnymi okresami manifestacji objawów (tzw. okres latencji), przy czym dla niskich dawek (dla danego typu zmiany) okres ten jest dłuższy niż w przypadku dawek wyższych.

Ze względu na poziom dawek progowych inicjujących te zmiany skutki deterministyczne są obserwowane przy relatywnie wysokich dawkach promieniowania, a więc np. tych otrzymywanych miejscowo w trakcie radioterapii, w ekspozycjach przewlekłych związanych z pracą w narażeniu (np. zmiany skórne czy zaćma w radiologii interwencyjnej) czy w zdarzeniach radiacyjnych.

W przypadku zdarzeń radiacyjnych, które często charakteryzują się krótkotrwałą ekspozycją całego ciała lub jego znacznej części na duże dawki promieniowania, może dojść do OChP przybierającej postać zespołów szpikowego, żołądkowo-jelitowego lub naczyniowo-mózgowego, w zależności od wielkości przyjętej dawki. Ostra choroba popromienna może prowadzić do zgonu osoby napromienionej. W przypadku przewlekłej ekspozycji na relatywnie wysokie dawki może natomiast wystąpić PChP [10,11].

Przykładowe dawki progowe dla różnego typu skutków deterministycznych wynoszą: 0,5 Gy dla zaćmy popromiennej i CVD, 2 Gy dla skóry oraz w przypadku OChP 1–2 Gy dla popromiennego uszkodzenia szpiku (faza subkliniczna), 2–6 Gy dla postaci zespołu szpikowego, 6–8 Gy – zespołu żołądkowo-jelitowego oraz 8–30 Gy – zespołu mózgowo-naczyniowego [10,11].

Z kolei przypadki PChP obserwuje się przy dawkach rocznych z przedziału 0,7–1,0 Gy lub dawkach skumulowanych >2–3 Gy [10].

Dla celów praktycznych (w szczególności ze względu na bardzo zróżnicowaną radiowrażliwość indywidualną, która sprawia, że pierwsze obserwowalne zmiany mogą pojawiać się u różnych ludzi przy różnych poziomach ekspozycji) dawkę progową definiuje się jako tę dawkę, która powoduje wystąpienie danego efektu zdrowotnego u 1% osób ekspozowanych [9].

Wartości poziomów dawek progowych są okresowo rewidowane przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP) na podstawie nowych ustaleń i wniosków z najnowszych badań epidemiologicznych, które uwzględniają np. dodatkowe czynniki ryzyka (wcześniej nieznane i pominięte w badaniach) czy nowy system szacowania dawek, np. obejmujący oddziaływania neutronów (szybkich i termicznych) z przeszkodami naturalnymi oraz wysokimi budynkami w przypadku badań kohorty LSS. Przykładami efektów deterministycznych, dla których dawki progowe były zmieniane w ostatnim czasie, są zaćma popromienna i CVD. W przypadku soczewek oczu dawki progowe były wielokrotnie rewidowane i zmieniały się od 15 Sv w 1977 r. [12] przez 5 Gy w przypadku ekspozycji jednorazowej i 8 Gy w przypadku ekspozycji frakcjonowanej lub przewlekłej w 1984 r. [13] do 2 Gy i 5 Gy, odpowiednio, dla ekspozycji jednorazowej i frakcjonowanej lub przewlekłej w 2007 r. [14].

Różnice w oszacowanych dawkach progowych dla zmian w soczewkach oczu spowodowanych promieniowaniem jonizującym wynikały również z innych ograniczeń ówczesnych badań. Na przykład we wcześniejszych badaniach nad zaćmą stosowano krótkie okresy obserwacji (za wyjątkiem badań kohorty LSS), które nie uwzględniały dłuższych okresów latencji dla niskich poziomów dawki, nie dysponowano też techniką pozwalającą na wykrycie ewentualnych drobnych zmętnień, a liczba przypadków zachorowań połączona z ekspozycją na niskie dawki była mała.

Ostania rekomendowana zmiana dawki progowej dla zaćmy i CVD pochodzi z 2011 r., kiedy to ICRP opublikowała swoje stanowisko, proponując znaczne obniżenie dawek progowych dla obu wymienionych rodzajów zmian do 0,5 Gy niezależnie od typu ekspozycji. Publikacja 118 ICRP z 2012 r. [10] zawiera przegląd wyników najnowszych badań poświęconych wczesnym i późnym skutkom deterministycznym. Jest to publikacja, w której po raz pierwszy w miejsce terminu

„skutki deterministyczne” pojawia się termin „reakcje tkankowe”. Dla spójności niniejszego tekstu określenie „skutki deterministyczne” będzie jednak nadal używane w dalszej jego części.

Należy zaznaczyć, że wpływ promieniowania na rozwój np. zaćmy popromiennej czy CVD w zakresie niskich dawek nie jest jeszcze w pełni poznany ze względu na duże niepewności dotyczące poziomów dawek progowych otrzymanych w różnych badaniach (szerokie przedziały ufności dla dawki progowej uwzględniając również wartość 0). Z tego powodu zaproponowana dawka progowa wynosząca 0,5 Gy dla zarówno zaćmy, jak i CVD jest raczej wynikiem konsensusu niż efektem istnienia dowodów naukowych i wymaga dalszych badań w celu jej potwierdzenia.

Ze względu na istnienie progu dawki, poniżej którego skutki deterministyczne praktycznie się nie pojawiają, zapobieganie ich występowaniu jest możliwe i teoretycznie stosunkowo łatwe (dla potwierdzonego z dużym prawdopodobieństwem progu dawki) – dawka skumulowana dla danej tkanki lub organu nie powinna przekraczać odpowiedniego progu dawki. Inaczej jest w przypadku drugiego typu efektów wywołanych działaniem promieniowania jonizującego na człowieka i organizmy żywe, tzw. skutków stochastycznych.

#### Skutki stochastyczne

W odróżnieniu od skutków deterministycznych skutki stochastyczne to te, które mogą występować przy każdej, nawet najmniejszej dawce promieniowania, a prawdopodobieństwo ich wystąpienia (a nie intensywność pojawiających się zmian) wzrasta wraz z dawką. Należą do nich nowotwory i skutki dziedziczne ujawniające się u potomstwa. Są to zmiany długoterminowe, które w przypadku nowotworów pojawiają się od kilku do nawet kilkudziesięciu lat po ekspozycji.

W przypadku badań dotyczących skutków zdrowotnych wywołanych wybuchem bomb atomowych w Hiroszynie i Nagasaki już kilka lat później stwierdzono zwiększoną liczbę przypadków białaczek (za wyjątkiem przewlekłej białaczki limfatycznej, która wydaje się nie być indukowana promieniowaniem jonizującym), dla których maksimum zaobserwowano w 6–8 lat po ekspozycji. Dziesięć lat po atakach odnotowano natomiast zwiększone ryzyko guzów litych, które występuje do dziś.

To, czy i jak wzrasta ryzyko rozwoju nowotworu w wybranym organie w wyniku działania promieniowania jonizującego, zależy od jego rodzaju. W przypadku pęcherza moczowego, piersi u kobiet, płuc, mózgu, tarczycy, okrężnicy, przełyku, jajników, żołądka, wątroby

i skóry (za wyjątkiem czerniaka złośliwego) ryzyko zachorowania na raka wzrasta znacząco, w przeciwieństwie do ryzyka dla trzustki, odbytnicy, macicy, prostaty i mięszu nerek, które nie wzrasta. [15]. Wyznaczona na podstawie danych epidemiologicznych z kohorty LSS zależność dawka–skutek dla guzów litych w zakresie średnich wartości dawek (tj. 0,15–1,5 Gy), a więc tych, dla których istnieje największa ilość danych, jest w przybliżeniu liniowa.

Z kolei wyniki dotyczące zwiększonego ryzyka guzów litych w wyniku działania promieniowania jonizującego w zakresie niskich dawek (<0,1 Gy) są statystycznie nieistotne. Ten wynik nie oznacza jednak, że zwiększone ryzyko przy niskich dawkach nie istnieje w ogóle – wskazuje on raczej na to, że ilość danych epidemiologicznych jest niewystarczająca, by odróżnić istnienie progu dawki od relatywnie niskiego ryzyka.

Z tego powodu w zakresie obejmującym niskie dawki przyjęto liniowy, bezprogowy model ryzyka, tzw. *linear no-threshold* (LNT), który jest ekstrapolacją danych z zakresu średnich i wysokich dawek do zakresu dawek obserwowanych u osób zawodowo narażonych na promieniowanie, czyli niskich. Liniowy model ryzyka zakłada więc, że wzrost zachorowalności na nowotwory jest proporcjonalny do dawki promieniowania jonizującego i bezprogowy, co oznacza, że nawet najmniejsza dawka promieniowania (pojedyncze oddziaływanie) może potencjalnie spowodować wzrost ryzyka.

Dowody świadczące o możliwości indukcji nowotworów w wyniku ekspozycji na promieniowanie jonizujące i przyjęcie modelu LNT sprawiły, że należało uwzględnić istnienie potencjalnego ryzyka zachorowania na nowotwory u dużej grupy pracowników, którzy byli narażeni na niskie dawki promieniowania. W ochronie przed skutkami biologicznymi promieniowania jonizującego pojawiło się więc nowe podejście, w którym środek ciężkości przesunięto z działań polegających jedynie na ograniczaniu ekspozycji do pewnego poziomu dawek (zapobieganie skutkom deterministycznym) na działania zmierzające również do zmniejszenia ryzyka zachorowania na nowotwory w populacji osób pracujących poprzez ograniczenie ekspozycji do „możliwie najniższych wartości”. Określenie to zyskało konkretną formę w postaci zasady ALARA (*as low as reasonably achievable*), która jest jednym z filarów obecnego systemu ochrony radiologicznej [14].

Należy również dodać, że teoria LNT ma swoich przeciwników. Są nimi m.in. zwolennicy i propagatorzy hipotezy hormezy radiacyjnej, a więc teorii mówiącej o korzystnym wpływie niskich dawek promieniowania na

organizmy żywe przejawiającym się w zmniejszeniu prawdopodobieństwa zachorowania na choroby nowotworowe i genetyczne. Zgodnie z tą teorią niskie dawki promieniowania, działając na organizm człowieka, stymulują zarówno pobudzenie podziałów komórkowych, jak i ich procesy naprawcze, przyczyniając się do zwiększenia odporności na większe dawki promieniowania [16].

### Obecny system ochrony radiologicznej

Zmiany w systemie ochrony radiologicznej były dokonywane skokowo i wynikały z 2 podstawowych czynników. Pierwszy z nich, o którym już wspomniano, to najnowsze zdobycze wiedzy dotyczące biologicznych skutków działania promieniowania jonizującego na organizm człowieka. Drugi to zmieniający się stosunek do akceptowanego ryzyka (który uwzględnia również czynniki ekonomiczne i etyczne). Przyjęto zasadę, że za jeszcze dopuszczalne ryzyko związane z zastosowaniem promieniowania jonizacyjnego uważa się to, które jest porównywalne z ryzykiem obserwowanym w innych dziedzinach działalności cywilizacyjnej. W ochronie radiologicznej za niedopuszczalne uznaje się ryzyko śmierci na poziomie  $10^{-3}$  w ciągu roku (tj. 1 osoby na 1000 narażonych).

Obecnie obowiązujący system ochrony radiologicznej został sformułowany przez ICRP dla ochrony osób zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące w celu ograniczenia skutków stochastycznych do toleralnych poziomów (na podstawie modelu LNT) i zapobiegania skutkom deterministycznym. Opiera się on na 3 głównych zasadach: uzasadnieniu ekspozycji, optymalizacji ekspozycji i limitowaniu dawek.

Pierwsza zasada ochrony radiologicznej (uzasadnienia ekspozycji) wymaga, by korzyści dla osoby indywidualnej lub społeczeństwa z każdej nowej działalności związanej z zastosowaniem promieniowania jonizującego przewyższały wszystkie koszty uwzględniające również potencjalny uszczerbek dla zdrowia związany z ryzykiem radiacyjnym. Parafrazując, działalność, która nie przynosi żadnych korzyści, nie jest uzasadniona. Praktyczną formą realizacji tej zasady jest istniejący system licencjonowania oparty na zezwoleniach, zgłoszeniach lub powiadomieniach, w którym instytucją licencjonującą w zależności od rodzaju działalności jest organ właściwy do wydania zezwolenia, przyjęcia zgłoszenia lub przyjęcia powiadomienia. Dla działalności przemysłowych związanych z narażeniem instytucją licencjonującą jest Państwowa Agencja Atomistyki (PAA) (art. 4 ust. 1 Prawa atomowego [17]), a w przypadku wydawania zezwoleń na wykonywanie działalności związanej

z uruchamianiem lub stosowaniem aparatów RTG w medycznej pracowni RTG i uruchamianiem tej pracowni lub uruchamianiem lub stosowaniem aparatów RTG do celów rentgenodiagnostyki, radiologii zabiegowej, radioterapii powierzchniowej lub radioterapii schorzeń nienowotworowych poza medyczną pracownią RTG – Państwowy Wojewódzki Inspektor Sanitarny (PWIS). Jeśli ostatnia z wymienionych działalności jest realizowana w jednostkach ochrony zdrowia podległych Ministrowi Obrony Narodowej, zezwolenie wydaje komendant wojskowego ośrodka medycyny prewencyjnej lub upoważniony przez niego wojskowy inspektor sanitarny wojskowego ośrodka medycyny prewencyjnej [17].

Druga zasada (optymalizacji ekspozycji) wymaga, aby dawki były tak niskie, jak to racjonalnie możliwe przy uwzględnieniu czynników ekonomicznych i społecznych zgodnie z zasadą ALARA. Narzędziem pomocnym w procesie optymalizacji ochrony radiologicznej są tzw. ograniczniki dawek, które stanowią ograniczenie dla dawek w odniesieniu do pojedynczego źródła promieniowania i powinny być ustalane prospektywnie w ramach analizy zysków i kosztów przed rozpoczęciem działalności. Koncepcja ograniczników dawek po raz pierwszy pojawiła się w Publikacji 60 ICRP [3]. Sformułowano ją jako narzędzie gwarantujące brak tworzenia się nierówności w procesie optymalizacji planowanych warunków narażenia, tj. aby osoby ujęte w schemacie optymalizacji nie były narażone na dawki znacznie przewyższające wartości średnie.

Trzecia zasada (limitowania dawek) odnosi się do otrzymywanych przez poszczególne osoby (zawodowo narażone lub z ogółu ludności) dawek promieniowania, które w warunkach normalnych, w praktyce prawnie usankcjonowanej, nie powinny przekraczać określonych limitów dawek (tzw. dawek granicznych), przy czym limity dawek nie dotyczą pacjentów. Ustalona przez ICRP na podstawie współczynników ryzyka określonych w badaniach kohorty LSS wartość dawki granicznej dla efektów stochastycznych (tzw. dawka na całe ciało, dawka skuteczna lub dawka efektywna) dla osób pracujących odpowiada w przybliżeniu poziomowi ryzyka, który jest uznawany za nieakceptowalny (ryzyko śmierci  $10^{-3}$  w ciągu roku). Dawki graniczne dla dawek równoważnych na poszczególne tkanki i organy są ustalane na podstawie odpowiednich wartości dawek progowych.

Wymienione zasady, które tworzą system ochrony radiologicznej, odnoszą się do źródeł promieniowania (zasady uzasadnienia i optymalizacji) lub do osób (zasada limitowania dawek). Choć rolą całego systemu ochrony radiologicznej jest m.in. ograniczenie negatywnych dla

zdrowia skutków promieniowania, a jego implementacja wymaga spełnienia wszystkich zasad bez wyjątku, to tylko ostatnia z nich w sposób bezpośredni dotyczy działań ukierunkowanych na profilaktykę zdrowotną konkretnej osoby.

Obowiązujące w Polsce Prawo atomowe [17] jest odzwierciedleniem w postaci norm prawnych obowiązującej wizji i zasad systemu ochrony radiologicznej opartej na Dyrektywie Rady Unii Europejskiej 2013/59/ EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 r. oraz na normach bezpieczeństwa dla ochrony ludzi i środowiska (*basic safety standards*) opracowanych i uaktualnionych w 2014 r. przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (International Atomic Energy Agency – IAEA) na podstawie najnowszych rekomendacji ICRP [14].

## DOZYMETRIA INDYWIDUALNA JAKO ELEMENT PROFILAKTYKI ZDROWOTNEJ W ZAKŁADZIE PRACY

### Obowiązek monitorowania dawek promieniowania jonizującego w miejscu pracy, w którym występuje narażenie na promieniowanie

Spełnienie zasady limitowania dawek w odniesieniu do indywidualnych pracowników w danym miejscu pracy w praktyce implikuje konieczność monitorowania ich dawek. Kontrola dawek jest więc integralnym elementem programu ochrony radiologicznej w każdym miejscu pracy, w którym realizowana jest działalność związana ze stosowaniem promieniowania jonizującego. Służy ona ocenie narażenia pracowników (również w celu zakwalifikowania pracownika do właściwej kategorii narażenia) i wykryciu ewentualnych przekroczeń ograniczników dawek, a w szczególności dawek granicznych stanowiących górną granicę dopuszczalnych dawek.

Pojęcia dawki pochłoniętej, dawki równoważnej i dawki efektywnej, przestrzenne i indywidualne równoważniki dawek dawki graniczne  
*Dawka pochłonięta D, dawka równoważna H<sub>T</sub>, dawka efektywna E*

Jednostki dozymetryczne wprowadzono w celu oszacowania w sposób ilościowy wielkości ekspozycji u ludzi i innych organizmów żywych. Podstawą badań epidemiologicznych jest precyzyjne wyznaczenie zależności dawka–skutek. Korzystając z tej zależności, określa się ryzyko związane z działaniem promieniowania jonizującego, które jest ważnym elementem w stworzeniu zasad ochrony radiologicznej. Główną jednostką fizyczną w ochronie radiologicznej jest dawka pochłonięta D,

która jest zdefiniowana jako średnia ilość energii  $d\epsilon$  pochłoniętej w jednostce masy  $dm$ . Jest to jednostka mierzalna. W układzie SI jednostką dawki pochłoniętej jest  $\text{Jkg}^{-1}$ , a jej nazwa specjalna to grej (Gy).

$$D = d\epsilon / dm \quad [1]$$

gdzie:

$d\epsilon$  – średnia ilość energii pochłoniętej,

$dm$  – jednostka masy.

Skutki biologiczne promieniowania zależą od wielu czynników: dawki pochłoniętej, mocy dawki (a więc sposobu frakcjonowania dawki), rodzaju promieniowania [np. cząstki alfa (jądra atomu helu), beta, fotony promieniowania gamma i RTG, neutrony, ciężkie jony itd.] i rodzaju napromienianych tkanek. Energia promieniowania jest przekazywana tkankom przez cząstki naładowane elektrycznie w oddziaływaniach z poszczególnymi atomami czy molekułami, co prowadzi do ich jonizacji, a więc oderwania elektronu/elektronów z powłok atomowych lub np. do zerwania wiązań cząsteczkowych. Cząstki nienaładowane (fotony, neutrony) oddziałują pośrednio poprzez uwolnienie w procesie oddziaływania cząstek naładowanych, które mają już zdolność do jonizacji materii.

W 1952 r. dostrzeżono, że skuteczność biologiczna promieniowania nie zależy jedynie od ilości zdeponowanej energii, ale także od jej przestrzennego rozkładu i gęstości jonizacji na jednostkę długości drogi cząstki jonizującej [18]. Różne typy cząstek [np. beta (elektrony) i cząstki alfa] mogą cechować się różną zdolnością jonizacji, nawet gdy ich energie są takie same. Cząstki alfa będą silniej niż elektrony jonizować materię, gdyż ich ładunek elektryczny jest 2-krotnie większy. Dodatkowo, przy założeniu tej samej energii, będą się one poruszać w pobliżu atomów materii z dużo mniejszą prędkością (ze względu na znacznie większą masę), tym samym znacznie zwiększając swoją szansę na ich jonizację. Skuteczność biologiczna cząstek alfa ze względu na dużą gęstość jonizacji na jednostkę przebytej drogi będzie więc znacznie większa niż elektronów o tej samej energii. Z tego powodu dawka pochłonięta uwzględniająca jedynie uśrednioną energię zdeponowaną w jednostce masy jest wielkością niewystarczającą do oceny skutków biologicznych promieniowania.

Aby uwzględnić udział różnego typu promieniowania w wielkości uszkodzeń spowodowanych działaniem promieniowania jonizującego w danym organie lub tkance, wprowadzono współczynniki wagowe pro-

mieniowania  $w_R$  dla różnego rodzaju promieniowania ( $w_R = 1$  dla promieniowania RTG i gamma oraz elektronów,  $w_R = 2$  dla protonów,  $w_R = 20$  dla cząstek alfa oraz ciężkich jonów i produktów rozszczepienia, a w przypadku neutronów  $w_R$  silnie zależy od ich energii i zmienia się od ok. 2,5 dla neutronów termicznych do 20 dla neutronów o energiach ok. 1 MeV [14]).

Współczynniki wagowe promieniowania określają względną skuteczność danego typu promieniowania w odniesieniu do promieniowania fotonowego (czyli przy zadanej dawce efekt działania promieniowania alfa jest 20 razy silniejszy niż efekt działania promieniowania RTG). W przypadku ekspozycji mieszanej wielkością, która służy ocenie biologicznych efektów działania różnego typu promieniowania w danej tkance lub organie, jest następująca suma ważona zwana dawką równoważną  $H_T$ :

$$H_T = \sum w_R \times D_{T,R} \quad [2]$$

gdzie:

$w_R$  – współczynnik wagowy promieniowania R,

$D_{T,R}$  – dawka pochłonięta w objętości tkanki lub organu T w wyniku działania promieniowania R.

Sumowanie dokonuje się po różnych typach R promieniowania. Jednostką dawki równoważnej w układzie SI jest  $\text{Jkg}^{-1}$ , a jej nazwa to siwert (Sv).

Aby ocenić prawdopodobieństwo wystąpienia efektów stochastycznych w wyniku działania promieniowania jonizującego na całe ciało, należy uwzględnić wszystkie organy i tkanki człowieka wrażliwe na promieniowanie jonizujące, biorąc pod uwagę ich różną wrażliwość na ten czynnik ryzyka. Dawka efektywna zdefiniowana w tym celu jest sumą ważoną dawki równoważnej i współczynników wagowych tkanek ( $w_T$ ):

$$E = \sum w_T \times H_T = \sum w_T \sum w_R \times D_{T,R} \quad [3]$$

gdzie:

E – dawka efektywna,

$H_T$  – dawka równoważna zdefiniowana w równaniu [2].

Sumowanie w pierwszej sumie odbywa się po różnych typach T tkanek/organów uwzględnionych w definicji dawki efektywnej, a  $\sum w_T = 1$  [13].

Jednostką dawki efektywnej w układzie SI jest  $\text{Jkg}^{-1}$ , a jej nazwa to siwert (Sv).

Z definicji tej wynika, że przy napromieniowaniu punktowym (tj. 1 tkanki lub organu) prawdopodobieństwo wystąpienia efektów stochastycznych jest znacznie

mniejsze niż w przypadku naświetlenia tą samą dawką całego ciała (odpowiednio,  $E = w_T \times H_T$ , gdzie  $w_T < 1$  vs  $E = H_T$ ).

Dawka efektywna i dawka równoważna, w odróżnieniu od dawki pochłoniętej będącej fizyczną i mierzalną wielkością, to tzw. jednostki ochronne. Są one zdefiniowane jedynie dla celów ochrony radiologicznej i nie są bezpośrednio mierzalne. Choć w układzie SI jednostka dawki pochłoniętej, dawki równoważnej i dawki efektywnej jest taka sama, to dla odróżnienia wyników określających wielkości ochronne uwzględniające już efekty biologiczne działania promieniowania zastosowano inną niż dla dawki pochłoniętej zwyczajowo wyrażanej w grejach jednostkę siwert. Inną jednostką dawki pochłoniętej stosowaną w literaturze jest 1 rad = 0,01 Gy, a dawki równoważnej – 1 rem = 0,01 Sv.

#### *Przestrzenny i indywidualny równoważnik dawki $H^*(d)$ i $H_p(d)$*

Dla potrzeb rutynowego monitoringu narażenia na promieniowanie jonizujące w miejscach pracy z uwagi na to, że wielkości ochronne, tj. dawka efektywna i dawki równoważne, nie są bezpośrednio mierzalne, wprowadzono odpowiednie wielkości operacyjne (zwane również wielkościami roboczymi), których wartości stanowią zazwyczaj górne oszacowanie wielkości ochronnych.

Dla ekspozycji zewnętrznych, dla potrzeb realizacji monitoringu środowiskowego oraz indywidualnego osób narażonych w miejscu pracy stosuje się, odpowiednio, wielkości operacyjne, takie jak przestrzenny równoważnik dawki  $H^*(d)$  oraz indywidualny równoważnik dawki  $H_p(d)$ , gdzie d to głębokość, na której mierzona jest dawka, odpowiednio, w kuli ICRU wykonanej z materiału tkankopodobnego lub poniżej określonego punktu na ciele (punkt ten zazwyczaj odpowiada miejscu, w którym noszony jest dozymetr indywidualny).

Do oceny dawki efektywnej w polach zewnętrznych rekomendowany jest pomiar dawki na głębokości  $d = 10$  mm. Mierzone przez dozymetr indywidualny lub środowiskowy w ramach dozymetrii indywidualnej i środowiskowej wielkości operacyjne to, odpowiednio,  $H_p(10)$  i  $H^*(10)$ . Z kolei w przypadku oceny dawki równoważnej dla skóry, w tym skóry dłoni i stóp, rekomendowana głębokość pomiaru dawki to  $d = 0,07$  mm, a dla soczewki oczu –  $d = 3$  mm. Wielkości operacyjne mierzone przez dozymetr indywidualny w ocenie dawki równoważnej na skórę, w tym skórę dłoni i stóp, to  $H_p(0,07)$ , a dla soczewki oczu  $H_p(3)$ . Jednostkami wielkości ochronnych jest również siwert. Bardziej szczegółowe opracowanie na temat wielkości dozy-

metrycznych stosowanych w ochronie radiologicznej pracowników narażonych na ekspozycję zewnętrzną można znaleźć w publikacji Brodeckiego i wsp. [19].

#### *Dawki graniczne*

##### Dawka efektywna

Centralną dawką graniczną w ochronie radiologicznej jest dawka graniczna dla dawki efektywnej wynosząca 20 mSv na rok (nie dotyczy sytuacji narażenia wyjątkowego, np. awarii). Jej rolą jest ochrona przed stochastycznymi skutkami promieniowania jonizującego. Roczne wartości dawek przekraczające powyższy limit są uznawane za nieakceptowalne, chociaż w pojedynczych przypadkach mogą być akceptowane przez instytucję licencjonującą (np. PAA, PWIS) pod warunkiem, że nie przekraczają 50 mSv w roku, a dawka skumulowana dla pracownika w kolejnych 5 latach (włączając rok, w którym wystąpiło przekroczenie) nie przekroczy 100 mSv.

Obecne przepisy dotyczące dawki granicznej dla dawki efektywnej są wynikiem zmian zaproponowanych w Publikacji 60 ICRP [3], kiedy to po raz pierwszy zarekomendowano obowiązujący limit, redukując dawkę graniczną z 50 mSv/rok [12] do 20 mSv/rok z możliwością jej przekroczenia w pojedynczym roku i dodatkowym warunkiem na dawkę sumaryczną w okresie 5 lat (jak zostało to opisane).

##### Dawka równoważna dla organów i tkanek

W przypadku dawek granicznych dla dawek równoważnych na organy i tkanki jeszcze w Publikacji 26 [12] ICRP rekomendowała, by dla żadnego organu, poza soczewką oka, nie przekraczały one 500 mSv/rok. Dla soczewki oka dawka graniczna została określona oddzielnie na podstawie obowiązującej wówczas wartości dawki progowej (wynoszącej 15 Sv) i założonego typowego czasu pracy (ok. 50 lat), co w konsekwencji dawało jej wartość wynoszącą 300 mSv/rok. Już w kolejnej Publikacji 60 ICRP [3], w której zaostrzono kryteria i zredukowano dawkę graniczną dla dawki efektywnej do 20 mSv/rok, stwierdzono, że wartość ta jest również wystarczająca do ochrony przed skutkami deterministycznymi wszystkich organów krytycznych z wyjątkiem skóry i soczewek oczu.

Z uwagi na to, że wśród tkankowych współczynników wagowych pojawiających się w definicji dawki efektywnej nie ma soczewek oczu (nowotwory popromienne nie są w nich indukowane), konieczność określenia oddzielnego limitu dla soczewek oczu nie jest zaskoczeniem. Zgodnie z rekomendacjami ICRP [10] dawka graniczna dla soczewek oczu ustalona na podstawie

obowiązującej dawki progowej 0,5 Gy wynosi obecnie 20 mSv/rok (po uśrednieniu w 5 kolejnych latach i w żadnym roku dawka nie może przekroczyć 50 mSv). W przypadku skóry, tkankowy współczynnik wagowy wynosi  $w_T = 0,01$  i wraz z dawką graniczną dla dawki efektywnej (20 mSv/rok) daje ograniczenie na dawkę skumulowaną dla skóry w wysokości 2 Sv/rok w przypadku miejscowych ekspozycji skutkujących jedynie narażeniem skóry. Przy założeniu 47 lat pracy (18–65 r.ż.) maksymalnie określona na tej podstawie dopuszczalna skumulowana dawka życiowa wyniosłaby ok. 100 Sv i nie byłaby wystarczającym limitem, by chronić pracownika przed skutkami deterministycznymi dla skóry. Dawka progowa np. dla teleangiektazji i późnej atrofii skóry po 5 latach od ekspozycji wynosi 30–40 Gy (Publikacja 60 ICRP § B183 [3]). Z tego powodu ICRP wprowadziła dodatkową dawkę graniczną dla skóry wynoszącą 500 mSv/rok. Ta sama wartość określa limit dawki dla dłoni, przedramion, stóp i kostek. Wszystkie powyższe limity [na soczewki oczu, skórę i kończyny (dłonie, przedramiona, stopy i kostki)] zostały zaimplementowane do polskiego Prawa atomowego.

W ekspozycji zawodowej system ochrony radiologicznej w Polsce zgodnie z rekomendacjami ICRP w sposób szczególnie traktuje grupy wysokiego ryzyka, takie jak osoby w wieku 16–18 lat i kobiety w ciąży lub karmiące piersią. Zgodnie z ustawą Prawo atomowe osoby w wieku <18 lat mogą pracować w warunkach narażenia jedynie w celu nauki lub przyuczenia do zawodu. Pierwszą z tych grup stanowią studenci korzystający w trakcie nauki ze źródeł promieniowania lub osoby odbywające praktyki zawodowe w miejscach pracy związanych z narażeniem na promieniowanie jonizujące. Dawki graniczne dla tej grupy wysokiego ryzyka wynoszą 6 mSv, 15 mSv i 150 mSv, odpowiednio, dla dawki efektywnej, dawki równoważnej dla soczewek oczu oraz dawki równoważnej dla skóry i kończyn (tj. dłoni, przedramion, stóp i kostek).

W przypadku drugiej grupy ochronie podlega płód znajdujący się w łonie matki, który zgodnie z odpowiednimi przepisami nie powinien otrzymać dawki efektywnej większej niż osoba z ogółu ludności, tj. 1 mSv (zgodnie z obowiązującą dawką graniczną dla dawki efektywnej dla osób z ogółu ludności). W praktyce oznacza to, że z chwilą, gdy kobieta poinformuje pracodawcę o ciąży, musi on tak dostosować jej warunki pracy (nie wykluczając jej z pracy), by zapewnić płodowi odpowiedni poziom ochrony. Kobieta karmiąca piersią nie może natomiast pracować w warunkach narażenia na skażenie promieniotwórcze.



Warto zaznaczyć, że w niektórych państwach, np. w Niemczech, zaostżono te normy w celu ochrony kobiet w wieku rozrodczym i przyjęto dodatkowy, nieujęty w rekomendacjach [14] limit dawki dla macicy, który wynosi 2 mSv/mies. [20].

#### Zasady kontroli narażenia zawodowego – kategorie narażenia, pomiary dawek indywidualnych lub środowiskowych

W zależności od przewidywanego poziomu narażenia pracownika jego ocenę przeprowadza się na podstawie pomiarów dawek indywidualnych (kategoria narażenia A – możliwość otrzymania dawki efektywnej  $>6$  mSv lub dawki równoważnej  $>15$  mSv na soczewki oczu lub 150 mSv na skórę i kończyny) lub na podstawie pomiarów dozymetrycznych w środowisku pracy (kategoria narażenia B obejmująca wszystkich pracowników niezaliczonych do kategorii A). Oznacza to m.in., że osoby w wieku 16–18 lat (a więc uczniowie i osoby przyuczające się do zawodu) mogą być jedynie zakwalifikowane do kategorii narażenia B.

Należy podkreślić, że kierownik jednostki organizacyjnej zgodnie z przepisami obowiązującego prawa może zdecydować, by również pracowników kategorii B objąć systematycznymi pomiarami dawek indywidualnych (Prawo atomowe, art. 17 pkt 4) [17]. Zaszeregowania pracownika do odpowiedniej kategorii narażenia dokonuje kierownik jednostki organizacyjnej i to on również zleca pomiary dozymetryczne odpowiednim laboratoriom badawczym mającym w danym zakresie akredytację. Okres pomiarowy dla pojedynczego cyklu pomiarowego nie może przekraczać 3 miesięcy.

W przypadku pracownika zaszeregowanego do kategorii A ocena narażenia prowadzona jest na podstawie odczytów dawek z dozymetru indywidualnego należącego do konkretnego pracownika i noszonego przez tego pracownika. Zmierzona dawka jest więc przypisana do konkretnej osoby. Zgodnie z przyjętym modelem LNT istnieje liniowy związek pomiędzy wielkością skumulowanej dawki efektywnej otrzymanej przez konkretną osobę a prawdopodobieństwem występowania u niej określonych skutków zdrowotnych zaliczanych do bezprogowych efektów stochastycznych promieniowania jonizującego, takich jak choroby nowotworowe lub dziedziczne.

Podobnie istnieje związek pomiędzy dawką równoważną na dłonie lub soczewki oczu mierzoną również przez dozymetr indywidualny noszony lub dozymetry indywidualne noszone przez konkretną osobę a występowaniem u niej skutków zdrowotnych zaszeregowanych

do tzw. efektów deterministycznych promieniowania (rumień, poparzenia czy martwica w przypadku skóry, zaćma i popromienne uszkodzenie szpiku), które pojawiają się dopiero po przekroczeniu określonego dla danej tkanki lub organu progu dawki. Z tego powodu szacowanie ryzyka wystąpienia określonych skutków zdrowotnych u konkretnego pracownika jest realizowane na podstawie dawki sumarycznej ustalonej na podstawie rejestru wszystkich otrzymanych przez niego odpowiednich dawek indywidualnych (np. dawki efektywnej w przypadku skutków nowotworowych czy dawki równoważnej na soczewki oczu w przypadku zaćmy).

Z kolei pracownicy zakwalifikowani do kategorii B „podlegają ocenie narażenia prowadzonej na podstawie pomiarów dozymetrycznych w środowisku pracy, chyba że kierownik jednostki organizacyjnej zadecyduje o objęciu ich systematycznymi pomiarami dawek indywidualnych”. Dawka zmierzona w ramach dozymetrii środowiskowej w przeciwieństwie do dawki indywidualnej nie jest bezpośrednią miarą narażenia konkretnej osoby. Dawka taka jest bowiem przypisana do źródła promieniowania jonizującego, a nie do konkretnej osoby. Pomiary środowiskowe służą raczej ocenie warunków narażenia w wybranym miejscu pracy (jest to pomiar natężenia promieniowania na stanowisku pracy w wybranym, konkretnym miejscu w przestrzeni, w którym przebywają pracownicy) i wykryciu ewentualnych nieprawidłowości w celu podjęcia czynności zapobiegawczych przywracających właściwe warunki pracy.

Pomiary środowiskowe formalnie i teoretycznie mogą być jednak stosowane, choć nie bezpośrednio, do oceny narażenia pracownika. Taka ocena wymaga m.in. rejestracji czasu pracy wszystkich osób przebywających na stanowisku a także – dla odwzorowania często skomplikowanych warunków ekspozycji – przyjęcia wielu uproszczających założeń, co pozwala jedynie na przybliżone przypisanie określonej dawki do konkretnego pracownika.

Zagadnienie oceny narażenia szczególnie komplikuje się w przypadku zarejestrowania przez dozymetr środowiskowy wyższych dawek – bliskich dawce granicznej lub ją przekraczających. Niedokładne oszacowanie dawki może mieć wówczas potencjalnie istotny wpływ na wielkość dawki życiowej pracowników. Proste metody polegające jedynie na rejestracji czasu pracy nie zawsze są wystarczające do przypisania z dużym prawdopodobieństwem dawki do konkretnych pracowników.

W związku z tym w przypadku stosowania w danym miejscu pracy wielu źródeł promieniowania lub urządzeń emitujących promieniowanie jonizujące o mocy

dawki zmieniającej się w trudny do określenia sposób (np. w przypadku zabiegów medycznych z użyciem fluoroskopii moc dawki na detektorze obrazu będzie uzależniona od wielkości pacjenta) i zatrudniania dużej liczby pracowników najwiarygodniejszą metodą oceny narażenia jest dozymetria indywidualna.

W ogólności wyniki pomiarów dozymetrycznych i prawidłowa ocena narażenia będą miały zasadnicze znaczenie dla podejmowanych działań w zakresie profilaktycznej ochrony zdrowia pracowników, której ramy określają Kodeks pracy, Prawo atomowe i powiązane akty wykonawcze. Nadzór medyczny nad pracownikiem wraz z monitorowaniem narażenia prowadzonym na podstawie rejestru dawek są podstawą działań profilaktycznych u pracownika zatrudnionego w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące. Na podstawie oceny stanu zdrowia i wielkości narażenia uprawniony lekarz orzeka o braku lub istnieniu przeciwwskazań do pracy na określonym stanowisku [17,21,22].

Należy podkreślić, że uzyskane wyniki pomiarów dawek indywidualnych warunkują kwestie zdolności do pracy i konieczność odsunięcia od pracy w narażeniu w przypadku przekroczenia dawki granicznej. Zgodnie z przepisami Prawa atomowego kierownik jednostki organizacyjnej powinien na bieżąco lub na żądanie pracownika informować go o wynikach oceny narażenia (Prawo atomowe, art. 17 pkt 5b i 5c) [17], a w przypadku stwierdzenia przekroczenia którejkolwiek z dawek granicznych ma obowiązek odsunąć go od pracy i skierować na badania lekarskie. Zgodnie z definicją profilaktyki, która oznacza zapobieganie wydarzeniom niekorzystnym (a w przypadku osób narażonych na promieniowanie jonizujące zdarzeniem niekorzystnym może być pogorszenie stanu zdrowia spowodowane nadmierną ekspozycją), jest to niewątpliwie działanie profilaktyczne służące zachowaniu zdrowia pracownika.

Dalsze postępowanie względem pracownika będzie zależeć od wyników sprawowanego nadzoru medycznego. W przypadku braku zgody uprawnionego lekarza na dalsze zatrudnienie pracownika w warunkach narażenia stosuje się odpowiednio przepisy prawa pracy odnoszące się do pracownika, u którego stwierdzono objawy wskazujące na powstanie choroby zawodowej [17].

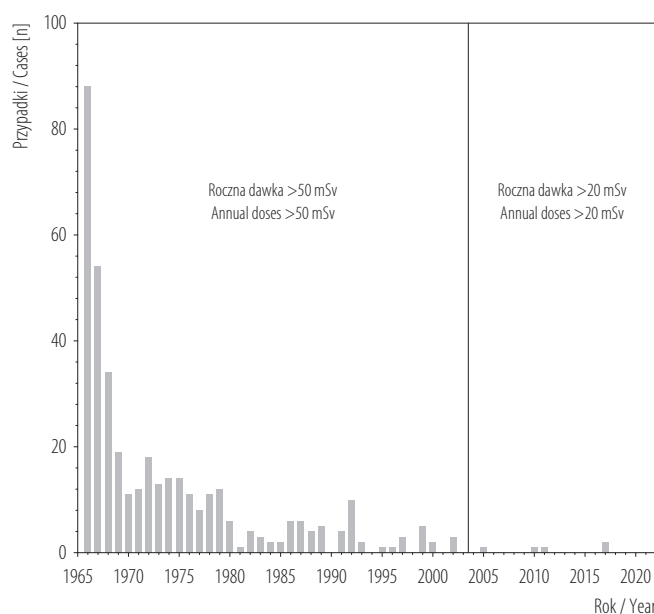
#### Wykres rocznych dawek promieniowania na przestrzeni kilku dekad

Zgodnie z danymi Zakładu Ochrony Radiologicznej Instytutu Medycyny Pracy (IMP) w Łodzi dotyczącymi ekspozycji zawodowej wartość średniej rocznej dawki

efektywnej dla osób pracujących w narażeniu na promieniowanie jonizujące nie przekracza 0,3 mSv przy dawce granicznej wynoszącej 20 mSv. W ostatnich latach przypadki przekroczeń dawek granicznych są obserwowane sporadycznie i dotyczą one tylko dawki efektywnej (ryciny 1–3).

Wyniki pomiarów realizowanych w ramach dozymetrii indywidualnej potwierdzają, że system ochrony radiologicznej oparty na limitowaniu dawek indywidualnych działa poprawnie. Ma to odzwierciedlenie w stwierdzonych w ostatnich latach pojedynczych przypadkach chorób zawodowych związanych z ekspozycją na promieniowanie jonizujące, do których zaliczają się: choroba popromienna uogólniona, o charakterze zapalnym lub zapalno-martwiczym skóry i tkanki podskórnej, przewlekłe popromienne zapalenie skóry, zaćma popromienna, przewlekłe uszkodzenie szpiku kostnego oraz nowotwory wywołane działaniem promieniowania jonizującego z prawdopodobieństwem indukcji przekraczającym 10% [23].

Dane z Rejestru Chorób Zawodowych [24] wskazują, że w ostatnich 5 latach stwierdzono 10 przypadków schorzeń związanych z narażeniem na promieniowanie jonizujące. Były to nowotwory płuc u górników ekspozowanych na promieniotwórczy radon (Rn-222) znajdujący się we wdychanym przez nich powietrzu i radioaktywne



**Rycina 1.** Dane dotyczące liczby przekroczeń dawki granicznej dla dawki efektywnej na podstawie bazy dawek Instytutu Medycyny Pracy z lat 1965–2022

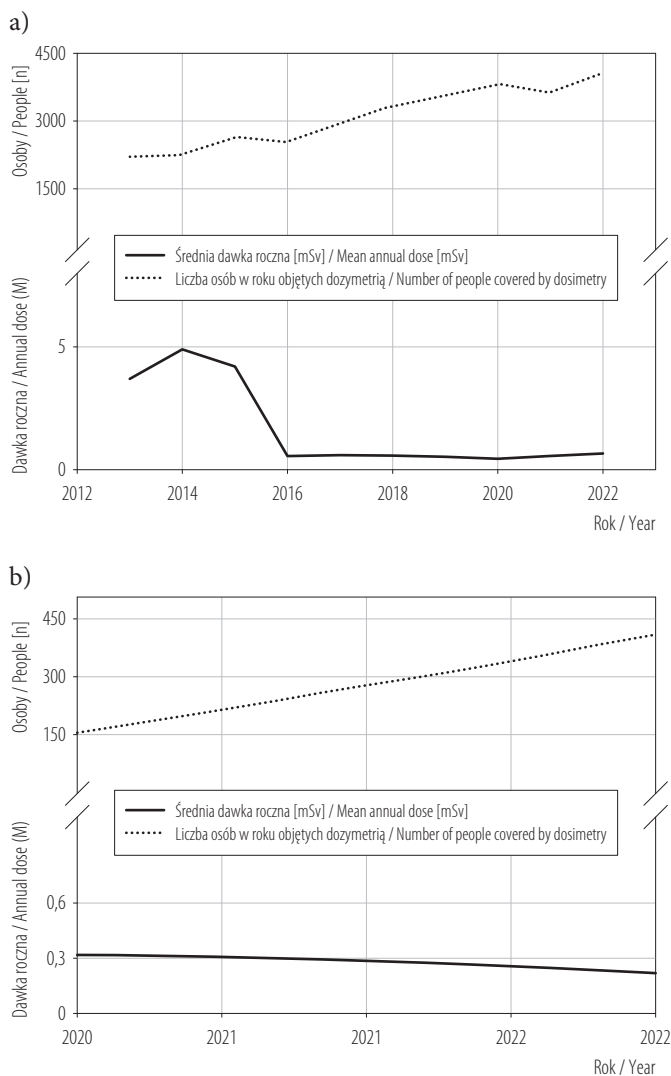
**Figure 1.** Data on the number of exceedances of the dose limit for the effective dose based on the Nofer Institute of Occupational Medicine dose database from 1965–2022

produkty jego rozpadu (8 przypadków) oraz zaćma promienna u lekarza i technika elektroradiologii (2 przypadki). Z drugiej strony warto wyniki te interpretować z pewną ostrożnością, gdyż podobnie jak w przypadku innych chorób zawodowych wskazuje się na niedoszacowanie danych także w obszarze schorzeń związanych z pracą w ekspozycji na promieniowanie jonizujące.

O chorobie zawodowej pracownika orzeka się m.in. na podstawie szacowania ryzyka na podstawie rejestru dawek. Będzie ono wiarygodne tylko wówczas, gdy dozymetry rejestrujące dawkę pracownika będą noszone zawsze, gdy wykonywana jest praca w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące, oraz gdy rejestr dawek będzie zawierać dane ze wszystkich miejsc pracy związanych z narażeniem zawodowym. Niespełnienie któregośkolwiek z tych warunków jest źródłem niedoszacowania wartości dawek skumulowanych, które może wpływać na wynik postępowania orzeczniczego. Z doświadczeń Zakładu Ochrony Radiologicznej IMP i kierowanych do niego zapytań dotyczących dawek życiowych dla indywidualnych osób (tj. pracowników lub byłych pracowników wykonujących prace w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące), ZUS-u lub sądów wynika, że pewne utrudnienia związane są przede wszystkim z uzyskaniem danych na temat dawek z różnych miejsc pracy, w szczególności, gdy dotyczą one odległego okresu zatrudnienia (np. w wyniku zlikwidowania poprzedniego miejsca pracy lub gdy archiwa uległy zniszczeniu).

Co więcej, inaczej niż w przypadku pracowników kategorii A, dla pracowników kategorii B, a więc znacznej większości osób zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące (wg PAA 95% pracowników to pracownicy kategorii B [25]), nie istnieje centralny rejestr dawek, w którym gromadzone byłyby informacje na temat dawek otrzymanych przez nich we wszystkich miejscach pracy. Każde z akredytowanych laboratoriów badawczych prowadzących rutynowy monitoring dawek indywidualnych w swoich analizach uwzględnia tylko niepełne dane dotyczące rocznego narażenia pracowników właśnie z uwagi na tzw. narażenie rozproszone.

Rozwiązaniem tego problemu byłoby wprowadzenie na wzór innych państw europejskich, takich jak Niemcy, Holandia czy Francja, centralnego rejestru dawek życiowych dla wszystkich pracowników z obu kategorii narażenia (A i B), w którym przechowywane byłyby dawki indywidualne z całego okresu zatrudnienia we wszystkich miejscach pracy [20,26,27]. Takie zalecenie zawarte zostało również w raporcie Polskiego Konsorcjum Ochrony Radiologicznej [28].



**Rycina 2.** Dane dotyczące rocznych dawek na: a) dłonie i liczby osób objętych dozymetrią palcową oraz b) soczewki oczu i liczby osób objętych dozymetrią oczną w latach 2020–2022 w Instytucie Medycyny Pracy

**Figure 2.** Data on annual doses to: a) hands and the number of people covered by finger dosimetry and b) lenses and the number of people covered by eye lens dosimetry in the Nofer Institute of Occupational Medicine

Dodatkowo w Niemczech – inaczej niż w innych państwach – wprowadzono dla ekspozycji zawodowej – oprócz rocznego limitu na dawkę efektywną – limit na skumulowaną życiową dawkę efektywną wynoszący 400 mSv [20]. Podstawą tej decyzji był fakt, że ocena ryzyka indukcji nowotworu spowodowanego promieniowaniem jonizującym może być dokonana na podstawie dostępnych danych epidemiologicznych w znacznie wiarygodniejszy sposób dla dawek rzędu wielokrotności 100 mSv niż na podstawie dawek rocznych na poziomie limitu 20 mSv.

Ustalenie limitu dla dawki życiowej wymaga stałego monitoringu dawek skumulowanych wszystkich nara-

zonych na promieniowanie i w konsekwencji umożliwia racjonalne wykorzystanie dużego zbioru gromadzonych danych do analizy skutków zdrowotnych promieniowania, a także implementację jej wyników do realizacji skutecznej profilaktyki zdrowotnej.

## WNIOSKI

Celem działań profilaktycznych w stosunku do osób zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące jest ograniczanie występowania skutków stochastycznych i zapobieganie skutkom deterministycznym. Obecny system ochrony radiologicznej oparty na modelu LNT zakłada, że każda, nawet najmniejsza dawka promieniowania może wywołać niepożądane skutki stochastyczne, dlatego wyeliminowanie ryzyka nie jest możliwe. Z drugiej strony nie jest też ono konieczne, a nawet racjonalne z uwagi na związane z tym wysokie koszty ekonomiczne.

Ochrona indywidualnych pracowników na podstawie wprowadzonego systemu ochrony radiologicznej i – w szczególności – zasady limitowania dawek – polega więc na zapobieganiu ekspozycjom, dla których ryzyko wystąpienia niepożądanych skutków zdrowotnych jest już nieakceptowalne. Dalsza redukcja narażenia może być realizowana do takich poziomów, które będą uzasadnione społecznie i ekonomicznie na podstawie rachunku zysków i kosztów zgodnie z zasadą optymalizacji ALARA. W praktyce realizacji celów ochrony radiologicznej w odniesieniu do konkretnych pracowników służą wprowadzone w przepisach prawa odpowiednie limity dawek (tzw. dawki graniczne) oraz system monitorowania dawek indywidualnych i środowiskowych osób narażonych w miejscach pracy.

Wartości limitów są określone na podstawie aktualnego stanu wiedzy i wyników badań naukowych dotyczących skutków zdrowotnych ekspozycji na promieniowanie jonizujące. Oznacza to, że pomiary dawek indywidualnych nie są jedynie formalnym wypełnieniem przepisów i nie służą wyłącznie wykazaniu zgodności poziomów ekspozycji z dawkami granicznymi określonymi w regulacjach prawnych. Pomiary dozymetryczne u indywidualnych osób wykonywane są w celu określenia poziomu ich ekspozycji i związanego z nim ryzyka potencjalnych skutków zdrowotnych. Tym samym są skierowane na profilaktykę lub bezpośrednio na utrzymanie stanu zdrowia konkretnej osoby; pozwalają określić, czy należy pracownika odsunąć od pracy (w przypadku np. przekroczenia dawki granicznej),

co niewątpliwie jest działaniem profilaktycznym służącym zachowaniu jego zdrowia.

Inaczej jest w przypadku pomiarów dawek środowiskowych, których wyniki w kontekście działań profilaktycznych służą przede wszystkim diagnozowaniu źródeł nieprawidłowości w miejscu pracy (a konkretnie na danym stanowisku pracy) i podjęciu czynności zapobiegawczych w celu przywrócenia w nim właściwych warunków. W przeciwieństwie do pomiarów dawek indywidualnych nie służą one bezpośredniej ocenie narażenia konkretnej osoby, choć w pewnych warunkach mogą być również w tym celu zastosowane.

Obowiązkiem kierownika jednostki organizacyjnej jest zaszeregowanie pracownika do właściwej kategorii narażenia oraz w przypadku jego zakwalifikowania do kategorii B dostosowanie rodzaju dozymetrii do spodziewanego poziomu narażenia. Należy pamiętać, że dozymetria indywidualna pozwala najwiarygodniej ocenić ekspozycję danego pracownika, a więc i ryzyko wystąpienia u niego niepożądanych skutków zdrowotnych, co pokazuje jej przewagę nad dozymetrią środowiskową w kontekście profilaktyki zdrowotnej i zapobiegania chorobom zawodowym.

## Wkład autorów

**Koncepcja badań:** Joanna Domienik-Andrzejewska

**Metodyka badań:** Joanna Domienik-Andrzejewska

**Zbieranie materiału:** Joanna Domienik-Andrzejewska

**Interpretacja wyników:** Joanna Domienik-Andrzejewska, Marta Wiszniewska

**Piśmiennictwo:** Joanna Domienik-Andrzejewska, Marta Wiszniewska

## PIŚMIENNICTWO

1. Loomis D, Guha N, Hall AL, Straif K. Identifying occupational carcinogens: an update from the IARC Monographs. *Occup Environ Med.* 2018;75(8):593–603. <https://doi.org/10.1136/oemed-2017-104944>.
2. Cooper NG. Radiation protection and the human radiation experiments. *Los Alamos Sci.* 1995;23. <https://doi.org/10.2172/251314>.
3. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP.* 1991;21(1–3):60–5.
4. Upton AC. Historical perspectives on radiation carcinogenesis in radiation carcinogenesis. In: Upton AC, Albert RE, Burns FJ, Shore RE, editors. *New York: Elsevier; 1986.* p. 1–10.

5. March HC. Leukemia in Radiologists. *Radiology*. 1944; 43(3).
6. Preston DL, Shimizu Y, et al. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13. Solid cancer and non-cancer disease mortality: 1950–1997. *Radiat Res*. 2003; 160(4):381–407. <https://doi.org/10.1667/rr3049>.
7. Preston DL, Ron E, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Radiat Res*. 2007;168(1): 1–64. <https://doi.org/10.1667/RR0763.1>.
8. Preston DL, Pierce DA, et al. Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates. *Radiat Res*. 2004;162(4):377–89.
9. Ron E, Preston DL, et al. Cancer incidence in atomic-bomb survivors. Part IV: Comparison of cancer incidence and mortality. *Radiat Res*. 1994;137(2 Suppl):S98–112.
10. 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):205–8.
11. Trzosa A, Kudła W, Łyżniński K, Korman M. Skutki zdrowotne ekspozycji na promieniowanie jonizujące. 2020; 55(1):32–47. <https://doi.org/10.12845/sft.55.1.2020.3>.
12. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 26. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. *Ann ICRP*. 1977;1(3).
13. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 41. Nonstochastic Effects of Ionizing Radiation. ICRP Publication 41. *Ann ICRP*. 1984;14(3).
14. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP*. 2007;37(2–4):61–5.
15. Ozasa K. Epidemiological research on radiation-induced cancer in atomic bomb survivors. *J Radiat Res*. 2016; 57(S1):i112–7. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrw005>.
16. Baldwin J, Grantham V. Radiation Hormesis: Historical and Current Perspectives. *J Nucl Med Technol*. 2015; 43(4):242–6. <https://doi.org/10.2967/jnmt.115.166074>.
17. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe. *DzU z 2023 r.*, poz. 1173.
18. Zirkle RE, Marchbank DF, Kuck KD. Exponential and sigmoid survival curves resulting from alpha and X-irradiation of *Aspergillus* spores. *J Cell Physiol Suppl*. 1952;39(Suppl):75–85.
19. Brodecki M, Domienik J, Zmysłony M. System wielkości dozymetrycznych do oceny poziomu dawek otrzymanych przez personel zawodowo narażony na zewnętrzne źródła promieniowania jonizującego. *Med Pr*. 2012;63(5):607–17.
20. Rühm W, Breckow J, Dietze G, Friedl A, Greinert R, Jacob P, et al. Dose limits for occupational exposure to ionising radiation and genotoxic carcinogens: a German perspective. *Radiat Environ Biophys*. 2020;59(1):9–27. <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00817-x>.
21. Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. Kodeks pracy. *DzU z 2023 r.*, poz. 1465.
22. Rozporządzenie Ministra zdrowia i opieki społecznej z dnia 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie pracy. *DzU z 2023 r.*, poz. 607.
23. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 czerwca 2009 r. w sprawie chorób zawodowych. *DzU z 2022 r.*, poz. 1836.
24. Instytut Medycyny Pracy [Internet]. Łódź: Instytut; 2023 [cited 2023 Oct 3]. Centralny Rejestr Chorób Zawodowych. Available from: <https://www.imp.lodz.pl/centralny-rejestr-chorob-zawodowych>.
25. Państwowa Agencja Atomistyki [Internet]. Warszawa: Agencja; 2023 [cited 2023 Oct 3]. Raport roczny Prezesa PAA za 2022 r. – zapraszamy do lektury. Available from: <https://www.gov.pl/web/paa/raport-roczny-prezesa-paa-za-2022-r--zapraszamy-do-lektury>.
26. Netherlands Commission on Radiation Dosimetry Subcommittee. Protection and Dosimetry of the Eye Lens. Commission; 2018. <https://doi.org/10.25030/ncs-031>.
27. Scanff P, Crescini D, Roy H, Billarand Y, Rannou A. National dose register in France within the national information system SISERI. *Radiat Prot Dosimetry*. 2016;170(1–4):429–32. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv424>.
28. Polskie Konsorcjum Ochrony Radiologicznej [Internet]. Konsorcjum; 2023 [cited 2023 Oct 3]. Ochrona radiologiczna w Polsce wobec wyzwań polskiego programu energetyki jądrowej – badania, rozwój, kadry. Available from: <http://konsorcjum.informa.waw.pl/wp-content/uploads/2023/11/Raport-OCHRONA-RADIOLOGICZNA-W-POLSCE-WOBEC-WYZWAN-POLSKIEGO-PROGRAMU-ENERGETYKI-JADROWEJ-BADANIA-ROZWOJ-KADRY.pdf>.