

Wpływ promieniowania jonizującego na organizm człowieka

Influence of ionizing radiation on human body

ZYGMUNT ZDROJEWICZ^{1,A}, ALINA SZLAGOR^{2,B}, MARTA WIELOGÓRSKA^{2,F},
DOROTA NOWAKOWSKA^{2,B}, JONATAN NOWAKOWSKI^{2,B}

¹ Klinika Endokrynologii, Diabetologii i Leczenia Izotopami Katedry i Kliniki Endokrynologii, Diabetologii i Leczenia Izotopami Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu

² Studenci Wydziału Lekarskiego Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu

A – przygotowanie projektu badania, **B** – zbieranie danych, **C** – analiza statystyczna, **D** – interpretacja danych, **E** – przygotowanie maszynopisu, **F** – opracowanie piśmiennictwa, **G** – pozyskanie funduszy

Streszczenie W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące negatywnego i pozytywnego wpływu promieniowania jonizującego na organizm człowieka. Promieniowanie jonizujące we współczesnej medycynie wykorzystywane jest w leczeniu, diagnostyce i radiologii zabiegowej i z tego powodu stanowi ważny aspekt w praktyce klinicznej zarówno dla lekarza, jak i pacjenta. W związku z interdyscyplinarną i powszechną naturą zjawiska ważne wydaje się poznanie skutków promieniowania jonizującego. Obowiązujące zasady i ograniczenia dotyczące stosowania promieniowania jonizującego w medycynie umożliwiają zoptymalizowanie dawki pochłanianej przez organizm i tym samym ograniczają nadmierną ekspozycję na promieniowanie, z jednoczesnym ograniczeniem negatywnych skutków. Wśród koncepcji dotyczących wpływu promieniowania jonizującego na organizm ludzki wyróżnia się powszechnie akceptowaną teorię liniową: progową i bezprogową, a także zupełnie jej przeciwstawną hormezę radiacyjną. Pomimo faktu, iż obowiązujące standardy ochrony radiologicznej oparte są na teorii liniowej, to hormeza radiacyjna wzbudza coraz większe zainteresowanie i podejmowane są liczne próby dowiedzenia jej prawdziwości. Kolejne badania naukowe poszerzające wiedzę na temat hormezy radiacyjnej mogą zmienić oblicze przyszłości. Być może badania te otworzą nowe możliwości zastosowania promieniowania jonizującego, jak i umożliwią obliczenie optymalnej i spersonalizowanej dawki dla pacjenta, pozwalając nam na wyznaczenie nowego „złotego środka” dla promieniowania jonizującego. W związku z tym uważamy, że przed zastosowaniem tych metod jest duża przyszłość, niemniej powinno się mieć na uwadze głównie dobro pacjenta.

Słowa kluczowe: promieniowanie jonizujące, radiologia zabiegowa, hormeza radiacyjna.

Summary This article describes positive and negative aspects of ionizing radiation and its effects on human body. Being a part of various medical procedures in medicine, ionising radiation has become an important aspect for both medical practitioners and patients. Commonly used in treatment, diagnostics and interventional radiology, its medical usage follows numerous rules, designed to reduce excessive exposure to ionizing radiation. Its widespread use makes it extremely important to research and confirm effects of various doses of radiation on patients of all ages. Two scientific theories, explaining radiation effects on human organism, stand in contrast: commonly accepted LNT-hypothesis and yet to be proven hormesis theory. Despite the fact that the current radiation protection standards are based on the linear theory (LNT-hypothesis), the hormesis theory arouses more and more interest, and numerous attempts are made to prove its validity. Further research expanding the knowledge on radiation hormesis can change the face of the future. Perhaps such researches will open up new possibilities for the use of ionizing radiation, as well as enable the calculation of the optimal and personalised radiation dose for each patient, allowing us to find a new “golden mean”. The authors therefore are careful and believe that these methods have a large future, primarily patient’s good should however be kept in mind.

Key words: ionizing radiation, interventional radiology, radiation hormesis.

Fam Med Prim Care Rev 2016; 18(2): 174–179

Wstęp

Promieniowanie jest tak naprawdę energią wysyłaną w postaci strumienia cząstek lub fal elektromagnetycznych. Poszczególne rodzaje promieniowania jonizującego charakteryzują odmienne właściwości, m.in. przenikliwość. Cząstki α (jądra helu) mają mały zasięg, 10 cm w powietrzu i około tysiąckrotnie mniej w tkankach ludzkich, zatrzymują się na kartce papieru. Cząstki β nie przenikają przez blachę aluminiową, wykazują nieco dłuższy zasięg, około 10 m w powietrzu. Promieniowanie γ jest najbardziej przenikliwe, przenika nawet przez płytę betonową, co ma istotne znaczenie w medycynie, stąd przy pracy z tym rodzajem promieniowania niezbędna jest osłona wykonana z metali ciężkich, np. z ołowiu [1].

Obecnie zastosowanie promieniowania jonizującego jest ogromne niemalże w każdej dziedzinie życia, a zwłaszcza w medycynie. Bez poznania właściwości poszczególnych rodzajów promieniowania niemożliwy byłby rozwój diagnostyki, badań obrazowych, jak również zastosowanie radioterapii w leczeniu onkologicznym czy wykorzystanie w radiologii zabiegowej [2]. Promieniowanie jonizujące towarzyszy nam od zawsze, a jego natężenie w czasach powstawania życia na ziemi było o wiele większe niż obecnie. Skorupa ziemska zawierająca pierwiastki radioaktywne, m.in. uran, tor i rad, jest jego naturalnym źródłem [3]. Promieniowanie dociera do nas z materiałów radioaktywnych znajdujących się w glebie oraz w żywych organizmach. Znaczną część promieniowania jonizującego na



naszej planecie stanowi promieniowanie kosmiczne. Średnio w ciągu roku tło promieniowania pochodzenia naturalnego na ziemi wynosi 2,4 mSv* [4]. Należy zauważyć, że dawka ta jest różna w zależności od lokalizacji, zatem trzeba wziąć pod uwagę prostą zależność – wraz ze zmniejszeniem się chroniącej nas warstwy atmosfery, wzrasta dawka promieniowania kosmicznego. W związku z tym w górach jego ilość jest około 2–3 razy większa niż na poziomie morza, a człowiek odbywający podróz kosmiczną otrzymuje około 30 razy większą jego dawkę [5]. Rozkład dawek nie jest stały na całej kuli ziemskiej ze względu na tzw. wahania tła. Efekt ten wywołany jest głównie zmienną zawartością radonu promieniotwórczego w glebie, przez co w północnej Skandynawii (Finlandia, Szwecja) średnia dawka promieniowania jest około 2,5 razy większa niż w Polsce, ponadto w niektórych miejscach na Ziemi średnie dawki promieniowania dochodzą do wartości 40 mSv rocznie (m.in. Brazylia, Indie). Rekordowe średnie dawki występują w Iranie, nawet do 265 mSv/rok [6].

W celu określenia ilości pochłoniętego promieniowania jonizującego wprowadzono szereg różnego rodzaju jednostek, jedną z nich jest siwert (Sv), którego nazwa pochodzi od nazwiska Rolfa Maximiliana Sieverta, szwedzkiego naukowca specjalizującego się w badaniach nad wpływem promieniowania jonizującego na organizm człowieka. Był on założycielem Międzynarodowego Stowarzyszenia Ochrony przed Promieniowaniem (IRPA) działającego do dnia dzisiejszego m.in. jako organ współpracujący ze Światową Organizacją Zdrowia (WHO). Jego działalność opiera się na podsumowywaniu wyników nowo powstających prac i badań z całego świata nad szkodliwym wpływem promieniowania jonizującego, a także organizacją szkoleń z zakresu ochrony radiologicznej [7]. Siwert wyraża dawkę równoważną i skuteczną, obie są miarą wielkości narażenia na promieniowanie. Poprzednikami siwertów były remy (1 Sv = 100 remów). Skutki radiobiologiczne po otrzymaniu 1 Sv, dawki stosunkowo dużej, nieuchronnie prowadzą do ostrej choroby popromiennej, dlatego większe znaczenie praktyczne mają milisiwerty (1 mSv = 0,001 Sv), które odpowiadają rzędem wielkości dawkom, na które najczęściej jesteśmy narażeni [8]. Zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z 2005 r. dawka graniczna dla pracowników, wyrażona jako dawka skuteczna (efektywna), wynosi 20 mSv w ciągu roku kalendarzowego [9]. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wartości promieniowania otrzymywanego podczas poszczególnych badań obrazowych. Warto również wspomnieć o jednostce służącej do wyrażania ilości pochłanianego promieniowania jonizującego, którą jest grej (Gy). O dawce napromieniania 1 Gy mówimy, gdy energia o wartości 1 J zostanie pochłonięta przez tkankę o masie 1 kg [8].

Tabela 1. Ilość pochłanianego promieniowania jonizującego w zależności od rodzaju wykonywanego badania poszczególnych części ciała

Obszar objęty badaniem	Rodzaj badania	Dawka efektywna (mSv)
Głowa	zdjęcie RTG	0,3
	TK	2
Zęby	zdjęcie RTG	0,005
	zdjęcie panoramiczne	0,01
Klatka piersiowa	zdjęcie RTG	0,1
	TK	1,5-7
	mammografia	0,4

* Siwert – jednostka promieniowania jonizującego.

Kręgosłup	zdjęcie RTG	1,5
	TK	6
Brzuch i miednica	zdjęcie RTG	0,7
	TK miednicy	7
	TK brzucha i miednicy	10
Kończyny	zdjęcie RTG	0,001

Zastosowanie promieniowania jonizującego

Promieniowanie jonizujące często kojarzy się w sposób negatywny w związku z problemami składowania odpadów radioaktywnych, użyciem broni jądrowej czy awariami elektrowni w Czarnobylu lub Fukushima. Nie można jednak zapominać o licznych dobrodziejstwach, które niesie ze sobą. Wykorzystujemy je nie tylko w medycynie, ale także w licznych gałęziach przemysłu, analizie chemicznej, geologii, ochronie środowiska. W niniejszej pracy skupimy się na zastosowaniu promieniowania jonizującego w leczeniu, diagnostyce i radiologii zabiegowej.

Rentgenodiagnostyka polega na wytwarzaniu promieniowania przez lampę rentgenowską, które następnie jest w różnym stopniu pochłaniane przez tkanki poddane badaniu. Obraz jest przedstawiany na błonach rentgenowskich lub prezentowany na monitorze w postaci cyfrowej. Z czasem wprowadzono badania z dodatkiem kontrastu posiadającego silne właściwości pochłaniania promieniowania, co pozwoliło uwidocznić zjawiska wcześniej niezauważalne. Kolejnym przełomem w diagnostyce okazało się wprowadzenie tomografii komputerowej, która umożliwiła przedstawianie obrazów trójwymiarowych. Stało się to możliwe dzięki zastosowaniu wirującej wokół pacjenta lampy rentgenowskiej, rzędów detektorów elektronicznych i specjalnemu programowi komputerowemu. Scyntygrafia opiera się na mierzeniu promieniowania wysyłanego przez badane tkanki, które wychwytyły wcześniej podany pacjentowi radiofarmaceutyczny, a także szybkości wydalania tego wskaźnika z organizmu. Na ogół chore miejsca (np. nowotwory) mają większą zdolność wychwytu tego pierwiastka od zdrowych. Stąd też gromadzą go znacznie więcej niż zdrowe tkanki, co uwidoczniłoby się następnie na obrazie scyntygraficznym [10]. W wyniku połączenia metod medycyny nuklearnej i tomografii komputerowej otrzymano komputerową tomografię emisyjną (SPECT). Wśród narzędzi diagnostycznych bazujących w swoim działaniu na promieniowaniu jonizującym znajduje się także: fluoroskopia, mammografia, densytometria. Jeśli chodzi o radiologię zabiegową, to polega ona na przeprowadzaniu procedur leczniczych i diagnostycznych w znieczuleniu miejscowym lub ogólnym przy równoczesnym użyciu obrazowania techniką rentgenowską w celu lokalizacji zmiany chorobowej i monitorowania medycznej procedury radiologicznej [11]:

- wentrykulografia – środek cieniujący w postaci powietrza zostaje wprowadzany do komór mózgu, co pozwala na dokładne obrazowanie,
- salpingografia – badanie kontrastowe jajowodu,
- mielografia – obrazuje rdzeń kręgowy, korzenie rdzenia i worek oponowy,
- defekografia – ocenia czynność odbytnicy,
- arteriografia – badanie tętnic,
- angiografia – szczególnie często wykorzystywana w obrazowaniu tętniaków, zwężeń, niedrożności tętnic, a także uwidoczniła unaczynienie patologiczne w guzach nowotworowych.

Niszczanie tkanki nowotworowej przy użyciu promieniowania jonizującego nazywane jest radioterapią, telera-

dioterapią, jeśli komórki nowotworowe napromieniane są spoza ciała pacjenta, brachyterapią, gdy źródło promieniowania znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie nowotworu [12]. Rodzaj terapii, dawki i strategię leczenia dobiera się indywidualnie dla każdego pacjenta. Szczególną uwagę poświęca się ograniczaniu wpływu na sąsiednie tkanki. W przypadku napromieniania głowy i szyi może dochodzić do działań niepożądanych w postaci: suchości jamy ustnej, zaburzeń smaku, zaczerwienienia i złuszczenia naskórka twarzy, utraty owłosienia okolicy głowy, aseptycznej martwicy kości w naświetlanym miejscu (osteoradionekroza), owrzodzeń i stanów zapalnych jamy ustnej. Efektywność działania zależy od promieniowrażliwości nowotworu, niską promieniowrażliwość wykazuje np. czerniak, a dużą rak anaplastyczny czy chłoniak. Radioterapię wykorzystuje się również w zapobieganiu restenozie naczyń po zabiegach angioplastycznych, leczeniu choroby Gravesa-Basedowa, a także zmian ortopedycznych [13]. Zjawisku promieniowania jonizującego zawdzięczamy również miniaturowe baterie jądrowe, które znalazły zastosowanie w stymulatorach serca u osób z zaburzeniami rytmu serca [14].

Efekty radiobiologiczne i nie tylko

Uszkodzenie materiału biologicznego przez promieniowanie jest bezpośrednim skutkiem transferu energii na cząsteczki chemiczne struktur komórkowych. Z powodu delikatnej natury chemicznych podstaw życia negatywne efekty promieniowania na organizm są niezwykle różnorodne. Wysokie energie przekazywane na cząsteczki prowadzą do produkcji dużych liczby wolnych rodników, a także zrywania i tworzenia nowych wiązań chemicznych. Zmiany obejmujące makromolekuły upośledzają czynności biologiczne, zmieniając często trzecio- i czwartorzędową strukturę białek i uszkadzając niezbędne struktury regulujące działanie komórki (DNA, RNA, enzymy) [15]. Komórka dysponuje mechanizmami naprawczymi, co zresztą niezbędne jest do funkcjonowania organizmu w środowisku naturalnym, które nie jest wolne od promieniowania tła. Przekroczenie progowej dawki promieniowania powoduje jednak uruchomienie procesów apoptotycznych [15]. Efekty tych zmian, takie jak: oparzenia skóry, zmiany w liczbie krwinek czerwonych i białych bądź katarakty, wywołane są deterministycznym wpływem promieniowania i nazywane są skutkami wczesnymi. Przy wysokich dawkach promieniowania masowa apoptoza komórek oraz idące za tym upośledzenie funkcji tkanek prowadzi do rozwinięcia chorobowych zmian ogólnoustrojowych określanych w medycynie nazwą choroby popromiennej. Skutki późne, czyli inaczej efekty stochastyczne, objawiające się głównie zmianami o charakterze nowotworowym, uzależnione są oprócz dawki promieniowania od innych czynników uzależnionych najczęściej od osobniczej zmienności, predyspozycji genetycznych czy miejsca przyjętego napromienienia. Przesunięcie w czasie wystąpienia skutków późnych od momentu ekspozycji może znacznie utrudniać postawienie wniosku o przyczynowo-skutkowym związku obu wydarzeń. Jak w każdym innym procesie fizycznym, tak i w przypadku promieniowania jonizującego wrażliwość tkanek na czynnik uszkadzający jest różna: upraszczając, przyjmuje się, że jest ona wprost proporcjonalna do stopnia proliferacji i odwrotnie proporcjonalna do stopnia zróżnicowania tkanki [15]. Za najbardziej odporną uznaje się tkankę nerwową [16], natomiast za najbardziej wrażliwe – znajdujące się głównie w szpiku kostnym – komórki krwiotwórcze, które są zarówno komórkami niedojrzałymi, jak i szybko dzielącymi się, stąd ich niebywała wrażliwość na uszkodzenia popromienne. Dojrzałe krwinki zaś należą do komórek stosunkowo odpornych na promieniowanie [15]. Ciekawym wyjątkiem

od tej reguły są limfocyty, szczególnie rodzaj dojrzałych, białych krwinek, które z nieznanego powodu są niezwykle promieniowrażliwe. Dawka promieniowania jonizującego powodująca natychmiastowy spadek liczby limfocytów w krwi obwodowej poniżej 1000/μl może nie od razu wpływać na inne komórki dojrzałe krwi. Jednakże wszystkie komórki krwi są stale zastępowane przez nowe. Jeśli produkcja nowych komórek jest upośledzona w wyniku uszkodzenia szpiku kostnego, populacja białych krwinek spadnie kilka dni po ekspozycji, czasem następuje wraz z nią powolny spadek liczby krwinek czerwonych. Krwinki czerwone żyją dłużej niż białe i sukcesywnie zastępowane są przez nowe, w związku z tym negatywny efekt ujawnia się nieco później. Już w 1903 r. promieniowanie rentgenowskie zostało wykorzystane do wyindukowania białaczki u myszy [17]. Wkrótce stało się powszechnie wiadome, że osoby na co dzień pracujące z promieniowaniem rentgenowskim bądź radem często cierpiały na problemy związane ze zmianami parametrów krwi, wahającymi się od lekkich leukopenii lub niedokrwistości po agresywne białaczki. Zarówno Maria Skłodowska-Curie, jak i jej córka zmarły z powodu białaczki spowodowanej przez wiele lat ekspozycji na rad. Efekty promieniowania nie ograniczają się jednak do tkanki krwiotwórczej. Oparzenia popromienne, po wcześniejszym wygojeniu, mają tendencję do częstego rozwijania nowotworów wiele lat po ekspozycji. W połowie lat dwudziestych XX wieku lekarze zaczęli odnotowywać zjawisko „Radium jaw” – „Szczęki radowej”, występujące u setek młodych kobiet pracujących w zakładach zajmujących się malowaniem tarczy zegarków odblaskową farbą zawierającą rad. Ich kości szczęk i żuchwy stawały się miękkie i porowate, w wyniku czego kobiety cierpiały z powodu spontanicznych złamań. Żęby tamały się i wypadały. Dziąsła były obolale i podatne na nawracające zakażenia bakteryjne. Objawom tym często towarzyszyła głęboka niedokrwistość [18]. W 1925 r. Harrison Martland, specjalista medycyny sądowej, stwierdził, że Zespół Szczęki Radowej został spowodowany śladową ilością radu, którą kobiety połykały przez formowanie końcówki pędzla wargami [18]. Jeśli niewielkie ilości promieniowania mogą doprowadzić do tak zatruwającego spustoszenia w organizmie, trudno wyobrazić sobie reakcję na dawki wielokrotnie większe. Tym szczególnym przypadkiem jest choroba popromienna, której przyczyną jest zwykle ekspozycja w następstwie wypadków jądrowych bądź wybuchu atomowego.

Choroba popromienna o charakterze ostrym bądź przewlekłym, w zależności od miejsca manifestacji symptomów, jest dzielona na postać hematologiczną, jelitową i mózgową [19]. Postaci te mogą być poprzedzone, choć nie muszą, objawami prodromalnymi (wczesnymi), takimi jak: nudności, wymioty, bóle głowy, zmęczenie, gorączka bądź krótkim okresem zaczerwienienia skóry [19]. Szybkość pojawienia się objawów związana jest z ekspozycją na promieniowanie, przy czym większe dawki skutkują szybszym wystąpieniem objawów. Postać hematologiczna charakteryzuje się anemią aplastyczną, często wtórnie prowadzącą do infekcji i krwawień [19, 20]. Gojenie się urazów i oparzeń jest znacznie utrudnione, co często komplikuje hospitalizację chorego [19]. Postać jelitowa obejmuje nudności, wymioty, utratę apetytu i bóle brzucha [19]. Wymioty popromienne, występujące zwykle w wyniku napromieniowania znacznego stopnia, mogą zostać uznane za marker ekspozycji całego ciała [19]. Bez metod leczenia, takich jak przeszczep szpiku kostnego, postać ta często kończy się śmiercią, następującą zwykle z powodu ciężkich, septycznych infekcji. W postaci naczyniowo-mózgowej choroby doświadcza objawów neurologicznych, takich jak zawroty i bóle głowy, a także zmniejszony poziom świadomości, pojawiający się w czasie od kilku minut do kilku godzin [19]. Niestety ta postać choroby nieuchronnie prowadzi do

śmierci [19, 20]. W sierpniu 1945 r. tragiczny rozdział w historii ludzkości dał nauce okazję zaobserwować na szeroką skalę zarówno wczesne, jak i późne skutki promieniowania. W wyniku bombardowania japońskich miast Hiroshimy i Nagasaki tysiące osób doświadczyły choroby popromiennej. Przeprowadzone w latach 1950–1990 badania długości życia populacji japońskiej, która przetrwała wybuchy, 334 zgony przypisały działaniu promieniowania jądrowego [21]. Choć liczba zgonów spowodowana promieniowaniem wynosiła zaledwie 1% wszystkich opisanych przypadków śmierci, w grupie badanej widoczne były liczne nieprawidłowości i problemy zdrowotne, w większości o charakterze nowotworowym [21, 22].

Hipotezy dotyczące wpływu promieniowania jonizującego na organizm człowieka

Wśród hipotez mówiących o wpływie promieniowania jonizującego na organizm człowieka najbardziej rozpowszechniona jest hipoteza liniowa bezprogowa (*linear no threshold* – LNT). Została ona przyjęta w 1959 r. przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP). Pomimo braku wystarczających badań i dowodów na prawdziwość tej hipotezy, model liniowej zależności skutków napromienienia od dawki obowiązuje aktualnie w przepisach ochrony radiologicznej, wciąż bowiem brak jest wystarczających danych co do braku ryzyka występowania nowotworów po ekspozycji na małe dawki promieniowania jonizującego. Do założeń hipotezy bezprogowej należy twierdzenie, że każdy akt jonizacji prowadzi do zwiększonego prawdopodobieństwa przekształcenia komórki prawidłowej w komórkę nowotworową. Skutki popromienne są proporcjonalne do dawki, jeżeli dawka mała jest 10-krotnie mniejsza niż duża, to zagrożenie, jakie ona stwarza, jest również 10-krotnie mniejsze. Narastające wątpliwości wobec tej koncepcji wynikają z braku dowodów na wpływ małych dawek (poniżej 200 mSv) na kancerogenezę [23]. The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) uznaje zasadę bezprogowego działania promieniowania jonizującego jako „ostrożne założenie”, które wymaga dalszych badań. Polscy specjaliści ochrony radiologicznej również wysuwają pewne zastrzeżenia wobec zasady bezprogowej, mówiąc o niej, że jest: „założeniem administracyjnym, a nie zasadą naukową” [24].

Przeciwieństwem hipotezy bezprogowej jest hipoteza progowa, która mówi, że do pewnej wartości dawki nie są obserwowane żadne efekty oddziaływania, natomiast powyżej obserwowana jest zależność liniowa między dawką, a efektem oddziaływania promieniowania jonizującego. Coraz bardziej popularna staje się hipoteza hormezy radiacyjnej, zgodnie z którą małe dawki promieniowania jonizującego nie tylko nie prowadzą do szkodliwych skutków, ale wręcz wywierają pozytywny wpływ na organizm człowieka. Po raz pierwszy przedstawili ją Southan i Ehrlich w 1943 r. (za [13]). Komitet Naukowy ONZ do badania skutków promieniowania UNSCEAR uznał znaczenie hormezy i wydał specjalny raport z zaleceniem dalszych badań pozytywnej roli promieniowania [25].

Hormeza radiacyjna

Nie ma wątpliwości, że duże dawki promieniowania są niebezpieczne dla organizmów, jednak wpływ małych dawek pozostaje niewyjaśniony. Hipoteza hormezy zakłada, że ograniczone dawki substancji uznanych za szkodliwe nie muszą mieć negatywnego wpływu na organizmy

żywe, a wręcz korzystny. Według jej propagatorów niskie dawki promieniowania stymulują naprawę DNA, zmiatają wolnych rodników oraz stymulują układ immunologiczny na poziomie komórkowym. Procesy te mają obniżyć ryzyko wystąpienia mutacji bądź nowotworzenia [26]. Często w kontekście tego zjawiska cytowany jest XVI-wieczny szwajcarsko-niemiecki lekarz, przyrodoznawca i filozof – Paracelsus, który powiedział: „Co jest trucizną? Wszystko jest trucizną i nic nie jest trucizną. Tylko dawka czyni, że coś jest trucizną”. Nie mamy wątpliwości, gdy odnosimy to stwierdzenie do leków, ale czy to samo można powiedzieć o promieniowaniu jonizującym? Przed I wojną światową pojawiła się „koncepcja progę”, według której dopiero powyżej pewnej dawki występowały negatywne skutki promieniowania jonizującego. Ogólny zachwyt promieniowaniem trwał do 1945 r., kiedy Stany Zjednoczone dokonały ataków atomowych na Hiroszimę i Nagasaki. Po tych wydarzeniach przestano pisać o pozytywnym wpływie promieniowania, a świat ogarnęła radiofobia. W 1959 r. Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP) przyjęła hipotezę liniową, która miała służyć ochronie osób zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące [23, 26]. Mimo braku niezaprzeczalnych dowodów potwierdzających tę hipotezę, do dziś opieramy się na niej w ochronie radiologicznej. Z jednej strony może się to wydawać słuszne, gdyż jeśli nie wiemy, jaki efekt przyniesie narażenie na promieniowanie jonizujące, lepiej się przed nim chronić. Z drugiej strony istnieje prawdopodobieństwo, że ochrona przed niskimi, poniżej 200 mSv, dawkami promieniowania jest całkowicie zbędna, a generuje znaczne koszty [27]. Organizmy żywe od zawsze były narażone na występujące w naturze promieniowanie. Jak było już wyżej wspomniane, na Ziemi znajdują się obszary, w których naturalne promieniowanie osiąga szczególnie wysokie wartości. Tereny te są zamieszkałe przez 5% światowej ludności, ich mieszkańcy otrzymują rocznie dawki kilkadziesiąt razy wyższe niż w Polsce (ok. 2,3 mSv), a w niektórych regionach jeszcze większe [28]. I tak w irańskim mieście Ramsar roczna dawka pochłanianego promieniowania z tła może sięgać 260 mSv, podczas gdy dopuszczalne w Iranie narażenie pracowników wynosi 20 mSv/rok. Pomimo takich warunków, w porównaniu z mieszkańcami sąsiednich obszarów o przeciętnym promieniowaniu tła, nie zaobserwowano wśród populacji Ramsaru częstszej zachorowalności na nowotwory. Co więcej, przeprowadzono badania *in vitro* na komórkach limfocytów, pobranych od mieszkańców terenów o wysokim oraz normalnym poziomie promieniowania tła. Komórki poddało działaniu dawki promieniowania gamma wysokości 1,5 Gy. Okazało się, że aberracje chromosomowe indukowane promieniowaniem występowały 44% rzadziej w komórkach od dawców z terenów o wysokim naturalnym promieniowaniu [29, 30]. W 1961 r. Żelew i wsp. przeprowadzili badania, które wskazywały, że wprowadzone do gleby sole uranu i promieniotwórcze łupki mają nieznacznie symulujący wpływ na wzrost nasion [31]. Z kolei Planel w swoich badaniach w 1966 i 1970 r. prowadzonych na pantofelkach (*Paramecium aurelia*) zaobserwował, iż tempo rozmnażania osobników, inkubowanych w warunkach zmniejszonego tła naturalnego promieniowania, jest znamienne zmniejszone, w porównaniu z grupą kontrolną [31]. W 1977 r. Kuzin prowadził podobne badania, ze zmniejszonym tłem promieniowania, na nasionach rzodkiewki, a później na szczurach. Również zauważył, że zmniejszenie promieniowania skutkuje wolniejszym wzrostem osobników [31]. Z powyższych badań wynikało, że promieniowanie jonizujące jest istotne dla wzrostu i rozwoju żywych organizmów. Badania Mine'a i wsp. wykazały hormezę popromienną wśród myszy napromienionych dawkami 1 mGy. Napromienowane myszy żyły dłużej, przy czym okazało się, że samce myszy

są bardziej wrażliwe na pozytywne efekty promieniowania. Mine i wsp. przebadali również 100 000 osób, które były narażone na promieniowanie po ataku atomowym na Nagasaki. Z ich analiz wynikało, że napromieniowanie całego ciała dawką poniżej 150 cGy spowodowało ogólny spadek śmiertelności mężczyzn rzędu 10%, ale z drugiej strony o 40% wzrosła śmiertelność z powodu raka. Badania te wykazały również, że układ immunologiczny mężczyzn jest bardziej podatny na efekty popromienne niż układ immunologiczny żeński [31].

Jak ograniczyć niekorzystne skutki działania promieniowania jonizującego?

Wiadomo nie od dziś, że nie unikniemy efektów ubocznych promieniowania jonizującego. Wszystko ma swoje dobre i złe strony. Nadmierne dawki promieniowania jonizującego mogą mieć fatalny wpływ na ludzki organizm. Skutki te zależą od kilku czynników, których modyfikacja pozwoliła na powszechne użytkowanie promieniowania w medycynie. Głównym czynnikiem jest oczywiście dawka promieniowania, w zależności od której możemy wyróżnić różne zespoły kliniczne [32]. Dlatego też niezbędna jest modyfikacja warunków przeprowadzania badań, która zapewniłaby najbardziej optymalną dawkę promieniowania zgodnie z zasadą ALARA – As Low As Reasonably Achievable – czyli tak niską jak to realnie możliwe, w celu minimalizacji ryzyka [32]. Należy pamiętać o odwrotnej proporcjonalności mocy promieniowania do kwadratu odległości od źródła promieniowania jonizującego, dlatego pierwszym sposobem naturalnego zmniejszenia dawki do nas docierającej powinno być zachowanie odpowiedniego dystansu między pacjentem i aparaturą. Ograniczenie do minimum czasu ekspozycji na promieniowanie jonizujące jest drugim podstawowym czynnikiem zmniejszającym dawkę pochłoniętą. Jednakże nawet przy ograniczeniu czasu ekspozycji do minimum dawka promieniowania była zbyt duża. Implikowało to rozwój nowych technologii, umożliwiających zmniejszenie dawki pochłoniętej przez organizm, takich jak do dziś stosowane filtry redukujące wielkość promieniowania [13, 32]. Obecnie w diagnostyce możliwe jest wytworzenie idealnej dawki, która pozwala uzyskać właściwą informację kliniczną [33, 34]. Przykładowo, w projekcji bocznej lub przy otyłym pacjencie potrzebujemy większej emisji promieniowania, za której wzrost lub spadek odpowiada automatyka aparatu [35]. W celu uzyskania optymalnej jakości wyników przy zwiększeniu odległości między aparaturą a pacjentem stosowane są wzmacniacze, które pozwalają na uzyskanie zadowalającego nas wyniku badania. Lekarze oraz technicy radiologii powinni stosować maksymalną ochronę własnego organizmu podczas badania pacjenta z użyciem promieniowania. Dla nich źródłem promieniowania jest sam pacjent, gdyż w radiologii zabiegowej, tam, gdzie pada pierwotna wiązka promieniowania, tam następuje rozproszenie promieni [13, 33]. W celu mi-

nimalizacji skutków ubocznych najkorzystniejszą opcją jest umieszczenie lampy pod stołem, na którym leży pacjent [32, 36]. W czasie zabiegów radiologicznych należy używać odpowiednich narzędzi zabiegowych pozwalających na zabezpieczenie np. rąk manipulujących podczas zabiegu przed bezpośrednią wiązką promieniowania [33]. Narzędziem najbardziej narażonym u operatora są soczewki oczu, tak więc niezbędne jest stosowanie specjalnych okularów bądź ustawienie przezroczystych ekranów ochronnych między pacjentem a operatorem [33]. Najbardziej narażone na promieniowanie są komórki szybko dzielące się, a zatem przede wszystkim należy zadbać o osłonę w postaci fartucha ochronnego i osłony na tarczycę oraz gonady [33]. Ogromne znaczenie ma tak naprawdę sama aparatura, więc niezbędna jest stała kontrola sprzętu. Najbardziej efektywną ochroną zarówno dla pacjenta i personelu medycznego jest dostosowanie optymalnej dawki promieniowania dla pacjenta [33, 34].

Podsumowanie

W trakcie procesu diagnostycznego pacjenci, prowadzeni przez różnych specjalistów, bywają niepotrzebnie narażeni na promieniowanie w związku z brakiem nadzoru nad przyjmowanymi dawkami oraz nieuzasadnionym wykonywaniem badań obrazowych przez lekarzy, często w krótkim odstępie czasu. Należy dbać o to, żeby narządy rozrodcze kobiet i mężczyzn nie były poddawane ekspozycji. Szczególne środki ostrożności powinny być zachowane w stosunku do małych dzieci i młodzieży ze względu na wzmoczoną radiowrażliwość w tych grupach wiekowych. Mimo licznych dowodów na negatywny wpływ dużych dawek promieniowania na organizm nie jesteśmy w stanie dokładnie prześledzić wszystkich mechanizmów jego działania. Liczne badania laboratoryjne wykazały skrócenie długości życia wśród zwierząt narażonych na działanie promieniowania jonizującego. Fakt ten może być przedmiotem różnych interpretacji. Czy efekt ten jest wywołany zwiększoną zapadalnością na nowotwory i związaną z tym wyższą śmiertelnością? Czy istnieje też inny, niespecyficzny, czynnik skracaający życie, związany z promieniowaniem jonizującym? Jeśli zaś chodzi o pozytywny wpływ promieniowania jonizującego, w obliczu przeprowadzonych badań trudno dojść do jednoznacznych wniosków. Pozytywny, stymulujący wpływ niskich dawek promieniowania, które z kolei prowadziły nawet do wydłużenia życia zwierząt laboratoryjnych, wydaje się pewny. Pojawia się jednak pytanie, czy faktycznie mogą one zmniejszać ryzyko występowania nowotworów, czy wręcz przeciwnie. Trudno powiedzieć, czy odstępianie od hipotezy liniowej na rzecz hormezy radiacyjnej przyniosłoby więcej korzyści niż strat. Radiofobia, rozumiana jako nadmierny strach przed promieniowaniem, niekoniecznie jest słuszna. Z całą pewnością niezbędne jest poszerzenie badań mających na celu określenie dawki odpowiedniej dla ludzkiego organizmu.

Źródło finansowania: Praca sfinansowana ze środków własnych autorów.

Konflikt interesów: Autorzy nie zgłaszają konfliktu interesów.

Piśmiennictwo

1. Karwowski A. *Encyklopedia popularna*. Wyd. XXII. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 1992: 688.
2. Wahlström B. *Promieniowanie, zdrowie i społeczeństwo*. Warszawa: Państwowa Agencja Atomistyki; 2000: 1–8.
3. Peńsko J. *Pole ziemskiego tła promieniowania gamma i metody jego badań*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 1977: 144.
4. Peńsko J. Problemy ochrony radiologicznej za granicą i w Polsce. *Nukleonika* 1958; 3: 417–427.
5. Włodarski J. *Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2010 roku*. Warszawa: Państwowa Agencja Atomistyki; 2011: 47–49.

6. Strupczewski A. Oddziaływanie małych dawek promieniowania na zdrowie człowieka. *Biul Mies PSE, Cykl: Energetyka atomowa* 2005; czerwiec–lipiec: 12–27.
7. Weissmann G. Fukushima Daiichi and Icarus: The Human Factor in a Meltdown (Sv = 1 J/kg.w). *FASEB J* 2011; 25(6): 1777–1780.
8. Hryniewicz A. *Wielkości i jednostki dozymetryczne. Obliczanie dawek promieniowania jonizującego*. W: Hryniewicz A, red. *Człowiek i promieniowanie jonizujące*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2001: 32.
9. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (Dz.U. z 2005 r., nr 20, poz. 168).
10. Czerwiński A. *Blaski i cienie promieniotwórczości*. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne; 1995: 7, 40.
11. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (Dz.U. z 2001 r., nr 3, poz. 18, z późn. zm).
12. Sas-Korczyńska B, Dixon BR, Skołyśzewski J, i wsp. Przerzuty nowotworowe do naczyńówki gałki ocznej. Przegląd metod leczenia ze szczególnym uwzględnieniem radioterapii. *Klin Ocz* 2006; 108(7–9): 346–352.
13. Futoma-Kołoch B, Piątkowski J. Promieniowanie jonizujące. Nie tylko zagrożenie. *Laboratorium* 2011; 7–8: 58–61.
14. Cheng A, Tereshchenko LG. Evolutionary innovations in cardiac pacing. *J Electrocardiol* 2011; 44(6): 611–615.
15. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *UNSCEAR 2006 Report. Effects of ionizing radiation. Vol. I. Report to the General Assembly, with scientific annexes A and B*. UNSCEAR; 2006: 14–20 [cited 10.04.2015]. Available from URL: http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2006_1.html.
16. Hopewell JW. Late radiation damage to the central nervous system: a radiobiological interpretation. *Neuropathol Appl Neurobiol* 1979; 5(5): 329–343.
17. Radford IR. Radiation response of mouse lymphoid and myeloid cell lines. *Int J Radiat Biol* 1994; 65(2): 203–215.
18. Hofman FL. Radium (mesothorium) necrosis. *JAMA* 1925; 85(13): 961–965.
19. Donnelly EH, Nemhauser JB, Smith JM. Acute radiation syndrome: assessment and management. *South Med J* 2010; 103(6): 541–546.
20. Turai I, Veress K. Radiation accidents: occurrence, types, consequences, medical management, and the lessons to be learned. *Central Eur J Occup Environ Med* 2001; 7(1): 3–14.
21. Bizzozero J, Johnson KG. Radiation-related leukemia in Hiroshima and Nagasaki, 1946–1964 – distribution, incidence and appearance time. *N Engl J Med* 1966; 274(20): 1095–1101.
22. Shimizu Y, Pierce DA, Preston DL, et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part II. Noncancer Mortality: 1950–1990. *Radiat Res* 1999; 152(4): 374–389.
23. Strzelczyk J, Potter W, Zdrojewicz Z. Rad-by-rad (bit-by-bit): triumph of evidence over activities fostering fear of radiogenic cancers at low doses. *Dose Response* 2007; 5(4): 275–283.
24. Jaworowski Z. Radiation risk and ethics. *Phys Today* 1999; 52(9): 24–29.
25. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *UNSCEAR 2000 Report. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. I. Report to the General Assembly with scientific annexes*. UNSCEAR; 2000 [cited 10.04.2015]. Available from URL: http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html.
26. Kraska A, Bilski B. Narażenie pracowników ochrony zdrowia na promieniowanie jonizujące a hipoteza hormezy radiacyjnej. *Med Pr* 2012; 63(3): 371–376.
27. Inhaber H. Are we paying too much to reduce radiological risk? *Nuclear News* 2000; 43(10): 33–35.
28. Moskal P. Dawki promieniowania jądrowego. *Foton* 2011; 112: 9–14.
29. Ghiassi-nejad M, Mortazavi SMJ, Niroomand-rad A, et al. Very high background radiation areas of Ramsar, Iran: preliminary biological studies. *Health Phys* 2002; 82(1): 87–93.
30. Karam PA. *The high background radiation area in Ramsar Iran: geology, norm, biology. LNL, and possible regulatory fun*. Proceedings of Waste Management 2002 Conference (Tucson, Arizona, 2002 Feb 24–28). Tucson: WM Symposia; 2002.
31. Kossakowski S, Kossakowski A. Pozytywne aspekty działania na organizm promieniowania jonizującego. *Med Ogólna* 1999; 5(XXXIV), 2: 201–210.
32. Barańska D, Biegański T. Filtracja jako sposób zmniejszenia narażenia pacjentów w diagnostyce radiologicznej. *Pol Prz Radiol* 2002; 67(1): 83–86.
33. Garcarek J, Falkowski A, Janczak D, i wsp. Higiena radiacyjna w pracowniach radiologicznych. *Post Hig Med Dosw* 2013; 67: 1391–1396.
34. Dyrektywa Rady 97/43/Euratom z dnia 30 czerwca 1997 r. w sprawie ochrony zdrowia osób fizycznych przed niebezpieczeństwem wynikającym z promieniowania jonizującego związanego z badaniami medycznymi oraz uchylająca dyrektywę 84/466/Euratom [cyt. 11.04.2015]. Dostępny na URL: [http://orka.sejm.gov.pl/Drekywy.nsf/all/31997L0043/\\$File/31997L0043.pdf](http://orka.sejm.gov.pl/Drekywy.nsf/all/31997L0043/$File/31997L0043.pdf).
35. Gilewska G. Możliwości wykonania maksymalnej liczby radiogramów w aspekcie ochrony pacjenta przed promieniowaniem rentgenowskim. *Pr Inst Elektrotechn* 2008; 237: 171–179.
36. Pruszyński B, Benendo-Kapuścińska B. *Radiologia: diagnostyka obrazowa Rtg, TK, USG, MR i radioizotopy*. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL; 1999: 180–188.

Adres do korespondencji:

Prof. dr hab. med. Zygmunt Zdrojewicz
Katedra i Klinika Endokrynologii,
Diabetologii i Leczenia Izotopami UM
ul. Pasteura 4
50-367 Wrocław
Tel.: 71 784-25-54
E-mail: zygmunt.zdrojewicz@umed.wroc.pl

Praca wpłynęła do Redakcji: 13.04.2015 r.

Po recenzji: 24.04.2015 r.

Zaakceptowano do druku: 17.05.2015 r.