

Aleksandra Kraska

Bartosz Bilski

## NARAŻENIE PRACOWNIKÓW OCHRONY ZDROWIA NA PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE A HIPOTEZA HORMEZY RADIACYJNEJ

EXPOSURE OF HEALTHCARE PERSONNEL TO IONIZING RADIATION  
IN THE LIGHT OF RADIATION HORMESIS HYPOTHESIS

Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego / University of Medical Sciences, Poznań, Poland

Katedra Profilaktyki Zdrowotnej / Department of Preventive Medicine

### STRESZCZENIE

Hormeza radiacyjna to hipotetyczne zjawisko pozytywnego wpływu niskich dawek promieniowania jonizującego (poniżej 200 milisievertów (mSv)) na organizmy żywe. Zgodnie z nim małe dawki promieniowania stymulują procesy naprawy DNA w komórkach, co zmniejsza ryzyko występowania mutacji i nowotworów. Teoria hormezy jest przeciwieństwem powszechnie akceptowanej hipotezy liniowej, która zakłada, że niskie dawki wywierają jedynie mniejsze, ale negatywne skutki na organizmy. Mimo dobrej znajomości efektów oddziaływania na organizm wysokich dawek promieniowania nadal nie do końca jasne są konsekwencje otrzymywania niskich dawek. Niskie dawki promieniowania przyjmowane są m.in. przez pracowników ochrony zdrowia pracujących w narażeniu na promieniowanie jonizujące. W Polsce otrzymują oni średnie dawki skuteczne indywidualne na całe ciało na poziomie około 0,1–0,25 mSv na kwartał. Hipotetycznie niewielkie dawki promieniowania jonizującego, wbrew rozpowszechnionym poglądom, mogą wywierać pozytywny wpływ na stan zdrowia. Należy jednak ostrożnie podchodzić do tego zagadnienia ze względu na brak wystarczających bezwzględnych dowodów potwierdzających prawdziwość teorii hormezy. Hipotetycznie niskie dawki otrzymywane przez personel medyczny mogą działać stymulująco na organizm. W takiej sytuacji wartościowe poznawczo byłyby dalsze szeroko zakrojone badania stanu zdrowia tej grupy zawodowej. Med. Pr. 2012;63(3):371–376

**Słowa kluczowe:** promieniowanie jonizujące, pracownicy medyczni, hormeza radiacyjna

### ABSTRACT

Radiation hormesis is a hypothetical premise that low doses of ionizing radiation (below 200 mSv) may be beneficial to living organisms. According to this hypothesis low doses of radiation stimulate the processes of DNA repair in cells. As a result they decrease the risk of aberration and the development of tumors. The theory of hormesis stands in contrast to the commonly accepted LNT-hypothesis, which suggests that low doses of radiation exert only small but also negative effects on organisms. However, the effects of high doses of radiation on the human organism are well elucidated, the effect of low doses is still unclear. Low doses of radiation are received, among others, by the health-care personnel who are employed in areas that are affected by ionizing radiation. In Poland they receive average effective individual doses to the whole body exposure of around 0.1–0.25 mSv per quarter of the year. Low doses of ionizing radiation, despite common views, may have a positive effect on health. However, one should approach this issue with some caution because of the current lack of sufficient and direct evidence that the theory of radiation hormesis is correct. Med Pr 2012;63(3):371–376

**Key words:** ionizing radiation, healthcare personnel, radiation hormesis

Adres autorów: Katedra Profilaktyki Zdrowotnej, Wydział Nauk o Zdrowiu,  
Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego, ul. Smoluchowskiego 11, 60-179 Poznań,  
e-mail: aleksandra\_kraska@o2.pl, bilski@ump.edu.pl  
Nadesłano 22 marca 2012, zatwierdzono 7 maja 2012

### WSTĘP

Kiedy ponad 115 lat temu Wilhelm Konrad Roentgen odkrył promieniowanie, które nazwano promieniowaniem X, nikt nie podejrzewał, że może ono powodować negatywne skutki zdrowotne u ludzi (1). Przez wiele lat pierwsi radiolodzy byli narażeni na bardzo duże dawki promieniowania. Cierpieli na nowotwory skóry, niedokrwiłość lub białaczkę spowodowaną

niczym nieograniczoną ekspozycją na promienie rentgenowskie (RTG). Dawki, jakie wtedy otrzymywali pracownicy, szacuje się na poziomie około 1 Gy rocznie. Spowodowane było to brakiem jakichkolwiek norm bezpiecznej pracy z promieniowaniem. Na szczęście, po wprowadzeniu odpowiednich limitów i przepisów dotyczących ochrony radiologicznej pracowników, dzisiejsi radiolodzy nie muszą już obawiać się wymienionych efektów napromienienia (2).

Polskie prawo określa dawki promieniowania (tzw. dawki graniczne), jakie mogą otrzymywać pracownicy pracujący w środowisku zwiększonego narażenia. Ponadto żeby zminimalizować negatywny wpływ tego czynnika na organizm ludzki, zostały usankcjonowane obowiązki zarówno pracodawców, jak i pracowników pracujących w narażeniu na promieniowanie jonizujące (3,4). Na wielkość narażenia pracowników na promieniowanie jonizujące mają wpływ (5):

- aktywność izotopu promieniotwórczego,
- dawka pochłonięta,
- dawka ekspozycyjna,
- dawka równoważna,
- dawka skuteczna (efektywna).

Obecnie obowiązujące w Polsce wartości dawek granicznych zostały określone w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 roku w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (4). Zgodnie z nim dawka graniczna dla pracowników narażonych na promieniowanie jonizujące, wyrażona jako dawka skuteczna, wynosi w Polsce 20 mSv otrzymanych w ciągu roku kalendarzowego. Dawka graniczna może być przekroczona w danym roku kalendarzowym do wartości 50 mSv – pod warunkiem, że w ciągu kolejnych 5 lat kalendarzowych jej sumaryczna wartość nie przekroczy 100 mSv. Dawka graniczna wyrażona jako dawka równoważna wynosi w ciągu roku kalendarzowego:

- 150 mSv dla soczewek oczu,
- 500 mSv dla skóry, jako średnia wartość dla dowolnej powierzchni 1 cm<sup>2</sup> napromienionej części skóry,
- 500 mSv dla dłoni, przedramion, stóp oraz podudzi.

Zgodnie z Ustawą z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (3) oraz rozporządzeniami wykonawczymi pracownicy zatrudnieni w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące zostają zaszeregowani do dwóch kategorii:

- A – otrzymujący roczną dawkę powyżej 6 mSv,
- B – otrzymujący roczną dawkę powyżej 1 mSv.

Podziału dokonano ze względu na stopień narażenia, w którym będą pracować, a miejsca pracy podzielono na tereny kontrolowane i tereny nadzorowane. Osobne ustępy przytoczonego rozporządzenia w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (4) regulują szczegółowe wymagania dotyczące kobiet w czasie ciąży i w okresie karmienia, praktykantów i uczniów poniżej 18. roku życia oraz szczególnych przypadków, np. sytuacji ratowania życia ludzkiego (3,4,6,7).

Osoby narażone na promieniowanie jonizujące mogą się spodziewać wystąpienia negatywnych skutków zdrowotnych przy przekroczeniu określonego,

wysokiego poziomu przyjętej dawki. Ze skutków tych możemy wymienić m.in. oparzenia, zacmę, wypadanie włosów, uszkodzenia układów limfatycznego i krwionośnego (8). Poziom wiedzy o wpływie niewielkich dawek promieniowania na organizm ludzki jest nadal dość ograniczony. Już przy minimalnej ilości przyjętej dawki promieniowania (mimo zastosowania środków ochrony pracowników) mogą wystąpić tzw. stochastyczne skutki promieniowania.

W przypadku efektu stochastycznego prawdopodobieństwo wystąpienia zmian zależy od dawki przyjętej przez narażonego. Ostrość występującego efektu nie zależy od wielkości przyjętej dawki. Zakłada się również, że nie istnieje minimalna bezpieczna dawka. Już przy minimalnym narażeniu mogą wystąpić poważne efekty, jak w przypadku mutacji jednego genu, która może doprowadzić do powstania nowotworu. Oczywiście możliwe jest także to, że efekt nie pojawi się wcale. W związku z taką naturą stochastycznych skutków promieniowania jonizującego bardzo skomplikowane jest ich zidentyfikowanie w badanej populacji narażonej na niewielkie dawki promieniowania. Skutki stochastyczne związane są z ryzykiem wystąpienia nowotworów (białaczek, z wyjątkiem przewlekłej białaczki limfatycznej, nowotworów tarczycy u osób młodych, nowotworów płuc i gruczołu piersiowego, nowotworów ślinianek i skóry) oraz mutagenezą (w tym z ryzykiem przeniesienia mutacji w materiale genetycznym gamet na przyszłe pokolenia) (9,10).

Zgodnie z danymi Instytutu Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi, Instytutu Fizyki Jądrowej w Krakowie oraz Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie w ostatniej dekadzie polski personel medyczny pracujący w narażeniu na promieniowanie jonizujące przeciętnie otrzymywał dawki skuteczne indywidualne na całe ciało w przedziale od 0,1 do 0,25 mSv na kwartał. Daje to średnią roczną dawkę na poziomie 0,4–1 mSv. Należy podkreślić, że 0,1 mSv jest progiem czułości metody pomiarowej stosowanej do oceny narażenia pracowników na promieniowanie. W związku z tym dla dawek rzeczywistych mniejszych od 0,1 mSv przyjmuje się 0,1 mSv na odczyt, czyli ok. 0,4 mSv na rok (po zsumowaniu dawek kwartalnych), co zawiąza ocenę (11–18). Nieco powyżej tej średniej dawki promieniowania otrzymują pracownicy medycyny nuklearnej i radiologii zabiegowej. Zdecydowana większość pracowników w Polsce nie otrzymuje dawek wyższych niż progi wykrywalności przyjęte przez poszczególne instytucje, które prowadzą odczyty dawkomierzy. Ponadto oceniając

rzeczywiste otrzymywane przez pracowników dawki, można stwierdzić, że w większości otrzymują oni dawki zdecydowanie niższe niż wynikające z aktów prawnych, które obowiązują w Polsce.

Na przestrzeni ostatnich lat przeprowadzono wiele badań dotyczących narażenia zawodowego pracowników ochrony zdrowia na promieniowanie jonizujące. Przykładem badań polskich są obserwacje Staniszewskiej i Jankowskiego (19) oraz Hrycka i wsp. (20). Badania z zakresu radiobiologii dotyczące wybranych funkcji krwi obwodowej u personelu pracowni rentgenowskiej wykazały zmiany we krwi związane z narażeniem pracowników na promieniowanie jonizujące (19). Z kolei badania dozymetryczne prowadzone wśród personelu pracowni radiologii zabiegowej wykazały, że osobą najbardziej narażoną w zespole zabiegowym na promieniowanie jonizujące był operator (20). Dawki graniczne natomiast dotyczące narażenia rąk i całego ciała nie były przekraczane.

W badaniach przeprowadzanych w Skandynawii i Francji wykazano korelację między występowaniem zaćmy a pracą w narażeniu na promieniowanie jonizujące (21–23). Wieloletnie amerykańskie badania nad ryzykiem wystąpienia raka piersi u kobiet zatrudnionych w narażeniu na promieniowanie w latach 1983–1998 wykazały, że rak piersi jest skorelowany z zatrudnieniem w takim narażeniu. Zdecydowana większość przypadków raka zdarzała się jednak u pracownic zatrudnionych przed rokiem 1940. Może to sugerować, że przyczyną takiego stanu rzeczy był mniej restrykcyjny system ochrony radiologicznej w latach wcześniejszych (24). Podobne wnioski wyciągnięto w badaniu analizującym występowanie raka piersi u amerykańskich zakonnic, które pracowały na stanowisku technika radiologii (25).

Istotne wydaje się również badanie przeprowadzone w Wielkiej Brytanii dotyczące umieralności na raka wśród lekarzy radiologów. Dane zebrano dla 100 lat (1897–1997), w czasie których lekarze otrzymywali bardzo zróżnicowane dawki promieniowania. W badaniu dane dotyczące umieralności lekarzy radiologów na raka i z powodu innych przyczyn porównano z danymi wszystkich badanych mężczyzn oraz danymi lekarzy płci męskiej innej specjalności z terytorium kraju. Wyciągnięto wnioski, że lekarze radiolodzy (zwłaszcza zatrudnieni po roku 1955, kiedy przepisy ochrony radiologicznej nie pozwalały już na przyjmowanie bardzo wysokich, jak na obecne normy, dawek) są grupą zdrowszą niż inni mężczyźni. Być może było to spowodowane stymulacją układu immunologicznego przez niskie dawki promieniowania jonizującego (26).

## HORMEZA RADIACYJNA – PRAWDA CZY MIT?

Hormeza radiacyjna to hipotetyczny efekt pozytywnego wpływu niskich dawek promieniowania jonizującego na organizmy żywe. Przez niskie dawki rozumiemy dawki z zakresu od 5 mSv do około 100–200 mSv dla promieniowania X i gamma (granice nie są ściśle określone). Dodatkowo należy podkreślić, że nie ma przekonujących dowodów na występowanie kancerogenezy przy przyjęciu dawek promieniowania poniżej 100 mSv (27–29).

Przed I wojną światową wprowadzono „koncepcję progę” po stwierdzeniu, że negatywne skutki promieniowania jonizującego występują tylko powyżej pewnego poziomu dawki. Już wtedy zgromadzono wiele danych eksperymentalnych pokazujących pozytywny wpływ małych dawek na organizm człowieka. Po 1945 roku doniesienia o pozytywnym wpływie promieniowania znikły jednak z łam pras i piśmiennictwa naukowego. Przyczyną mógł być przede wszystkim strach przed bronią jądrową, która stała się potężnym czynnikiem odstraszenia i ważnym elementem polityki globalnej. Radiofobia objęła wówczas cały świat (28,30).

Obecnie w ochronie radiologicznej obowiązuje hipoteza liniowa. Zakłada ona, że te same skutki popromienne (nowotwory, mutacje genetyczne) występują po ekspozycji zarówno na wysokie, jak i niskie dawki, a tylko częstość ich występowania jest większa proporcjonalnie do dawki. Wpływ małych dawek promieniowania na organizm może być określony przez liniową ekstrapolację skutków zaobserwowanych dla dużych dawek. Zgodnie z hipotezą nie ma żadnych „bezpiecznych dawek” promieniowania, ponieważ przyjęcie nawet bardzo niewielkiej dawki może mieć niebezpieczne następstwa.

Hipoteza liniowa została przyjęta w 1959 roku przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP) w celu ochrony osób narażonych zawodowo na promieniowanie jonizujące. Było to jedynie robocze założenie, które z biegiem lat przyjęto za fakt naukowy. Istnieją jednak istotne dowody wskazujące na nielogiczność hipotezy liniowej. Na jej dyskusyjność szczególnie zwrócono uwagę po katastrofie w Czarnobylu. Na jej podstawie przesiedlono na Białorusi, Ukrainie i w Rosji około 400 tys. ludzi. Spowodowało to masowe choroby psychosomatyczne i obniżenie długości życia, wywołane stresem i pogorszeniem jakości życia, oraz materialne straty wynoszące dziesiątki miliardów dolarów. Co więcej, nie wykazano zakładanego wzrostu śmiertelności spowodowanego promieniowaniem po katastrofie (29–31).

Innym przykładem podważającym hipotezę liniową są ostatnio przeprowadzone badania nad stochastycznym modelem odpowiedzi komórek na promieniowanie, przeprowadzone przez Fornalskiego i wsp. (32). Zaprezentowany został nowy algorytm bazujący na technice modelowania Monte Carlo z łańcuchami Markowa oparty na kilkunastu parametrach wejściowych, które opisują fizykę i biologię wirtualnej komórki. Na podstawie badań wyciągnięto wnioski, że dotychczasowe myślenie o organizmach jako układach liniowych jest błędne – również hipoteza liniowa odpowiedzi komórki na dawkę promieniowania staje się więc coraz bardziej dyskusyjna.

Toksykologowie w pełni zgadzają się ze zdaniem Paracelsusa, XVI-wiecznego szwajcarskiego lekarza, który twierdził, że „nic nie jest trucizną i wszystko jest trucizną, tylko dawka czyni coś trucizną” (29). Być może podobną zasadę można odnieść do promieniowania jonizującego. Hormezy radiacyjna opiera się na założeniu, że niskie dawki promieniowania wywierają pozytywny wpływ na zdrowie. Zgodnie z hipotezą hormezy radiacyjnej niskie dawki promieniowania stymulują proces naprawy komórkowego DNA (poziom molekularny), zmiatanie wolnych rodników (poziom molekularny) oraz stymulację układu immunologicznego (poziom komórkowy), co w rezultacie ma obniżać ryzyko wystąpienia mutacji bądź wytworzenia nowotworu (27–29,31,33). Sygnalizacja uszkodzeń rozpoczyna się wcześniej, przy dawkach rzędu kilku mGy i wzrasta do maksimum przy 0,1–0,2 Gy. Jednocześnie występuje wzrost tempa naprawy uszkodzeń, dlatego optymalne sytuacje z punktu widzenia efektów hormetycznych występują przy niższych dawkach.

Przy dawkach przekraczających ok. 0,5–0,6 Gy układ zapobiegania uszkodzeniom przestaje działać. Jedynym efektem obronnym pozostaje apoptoza, czyli proces programowej śmierci i usuwania komórek z uszkodzonym lub źle naprawionym genomem. Apoptoza może być zainicjowana przez dawki już kilku milisiwertów (mSv). Oczywiście skuteczność zależy od dawki promieniowania, a także rodzaju komórek i tkanek napromienionych. W przypadku wysokiej efektywności tego procesu zredukowane zostaje prawdopodobieństwo wystąpienia zmian patologicznych, zahamowana zostaje także proliferacja. Należy jednak wziąć pod uwagę, że jeśli duża liczba komórek zostanie poddana działaniu promieni jonizujących, zostanie wzmocniony mechanizm obronny organizmu oraz jego mechanizmy naprawcze i proliferacyjne. Organizm jako całość broni się przed utratą integralności. W wyniku pobudzenia

układu immunologicznego zredukowane zostają bez porównania większe skutki uszkodzeń DNA – spowodowane czynnikami innymi niż promieniowanie jonizujące (27,34).

Przełomem w przypadku hormezy radiacyjnej stało się opublikowanie w roku 1994 (z inicjatywy delegacji polskiej) raportu Komitetu Naukowego Narodów Zjednoczonych ds. Skutków Promieniowania Atomowego (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – UNSCEAR). Dokonano w nim przeglądu najważniejszych prac z tej dziedziny, starając się wyjaśnić mechanizmy biologiczne hormezy. Powstało wiele artykułów krytykujących hipotezę liniową, apelowano też, aby w ochronie radiologicznej korzystać z innej zasady.

Kilka lat temu było ponad 3 tys. publikacji, które przedstawiają pozytywne skutki zdrowotne ekspozycji na promieniowanie jonizujące, i wciąż wydawane są nowe (27–31,34). W roku 2008 profesor Edward Calabrese (35), który od ponad 20 lat prowadzi badania nad zjawiskiem hormezy radiacyjnej, zainicjował powstanie stowarzyszenia – International Dose-Response Society – zajmującego się tematyką niskich dawek. Z jego inicjatywy powstało także czasopismo „Dose-Response Journal”, na którego łamach naukowcy zajmujący się tematyką hormezy mogą publikować doniesienia ze swoich badań. Jest ono także forum wymiany poglądów dla zainteresowanych tą tematyką.

Wiele badań epidemiologicznych dowodzi słuszności hipotezy hormezy radiacyjnej. Przykładem są badania przeprowadzane na populacjach, które przeżyły wybuch jądrowy (Hiroszima, Nagasaki), awarię elektrowni jądrowej (Czarnobyl), a także badania populacji zamieszkujących tereny o naturalnie wysokim tle promieniowania (USA, Iran, Ramsdan) (31,36–39). Wszystkie przytoczone badania dowodzą, że niskie dawki mają neutralny, a nawet pozytywny wpływ na zdrowie.

Z kolei wyniki badań radiobiologicznych wskazują, że komórki wykazują dużą reaktywność na niskie dawki, nie obserwuje się indukcji raka pod wpływem oddziaływania niskich dawek, a dodatkowo niskie dawki stymulują możliwość naprawy uszkodzeń pochodzenia radiogenego i nieradiogenego (27,40).

Przy obrazowaniu wpływu ekspozycji zawodowej na pracowników istotne wydają się wyniki badań populacji zatrudnionych w przemyśle nuklearnym. Przykładem są badania przeprowadzone w Oak Ridge National Laboratory w Stanach Zjednoczonych (41). Przeprowadzono je na pracownikach laboratoriów jądrowych, a nie zakładów stosujących promienio-



wanie w medycynie, jednak warto przytoczyć jego wyniki. Po analizie wyników badań populacji 14 tys. osób zatrudnionych w laboratorium Oak Ridge w latach 1943–1972 zaobserwowano kilka zależności. Stwierdzono, że na każde pochłonięte 10 mSv promieniowania przez osoby po 45. roku życia następuje 5-procentowy wzrost zachorowań na wszelkie kategorie nowotworów po 10 latach i 7,3-procentowy po 20 latach ekspozycji. U osób ekspozowanych na promieniowanie przed 45. rokiem życia stwierdzono zmniejszenie liczby zgonów po 10 latach o 0,7% i wzrost ich liczby po 20 latach o 0,24%. Badana populacja osób narażonych reprezentowała przeciętnie lepszy stan zdrowia niż ogół mieszkańców USA, natomiast zaobserwowano w niej statystycznie większą zachorowalność na białaczkę. Stwierdzono ponadto, że załamanie odporności na promieniowanie jonizujące zachodziło między 40. a 55. rokiem życia (41).

Podobne badanie zostało wykonane również w Polsce, w ośrodku jądrowym w Świerku (42). Dokonano szczegółowej analizy dawek, na które są ekspozowani pracownicy, oraz występujących u nich chorób nowotworowych. Materiał do badań stanowiły dane dozymetryczne oraz medyczne dotyczące ponad 4 tys. pracowników zatrudnionych w latach 1956–2001. Zauważono nieznaczny statystycznie spadek zachorowalności na nowotwory w grupie osób poddanych działaniu promieniowania jonizującego. Co więcej, zauważono, że w grupie badanej istnieje znaczny spadek zachorowalności w stosunku do statystyk krajowych. Ponadto uwagę zwraca, że u osób, u których odnotowano dawki skuteczne od 35 mSv wzwyż, nie odnotowano ani jednego przypadku choroby nowotworowej (42).

## PODSUMOWANIE

Mimo wieloletnich badań nad wpływem promieniowania jonizującego na organizm nadal praca w jego środowisku wiąże się ze obawami przed szkodliwymi skutkami takiego narażenia. W świetle przedstawionych wyników badań można zaryzykować hipotezę, że niewielkie dawki, jakie otrzymuje personel medyczny podczas wykonywania swoich obowiązków zawodowych, niekoniecznie muszą wpływać negatywnie na stan jego zdrowia. Niskie dawki otrzymywane przez personel medyczny hipotetycznie mogą działać stymulująco na organizm. W takiej sytuacji wartościowe poznawczo byłyby dalsze, szeroko zakrojone badania stanu zdrowia tej dość homogenicznej grupy zawodowej.

## PIŚMIENNICTWO

1. Bałturkiewicz Z., Musiałowicz T.: 100 lat ochrony przed promieniowaniem jonizującym. Raport CLOR nr 136. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa 1999
2. Statkiewicz-Sherer M., Visconti P., Ritenour E.: Radiation Protection in Medical Radiography. Mosby, St. Louis (USA) 1998, ss. 123–124
3. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe. DzU z 2007 r. nr 42, poz. 276 z późn. zm.
4. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego. DzU z 2005 r. nr 20, poz. 168
5. Kwołczak-El Korbi I.: Zasady ochrony przed promieniowaniem jonizującym. W: Pruszyński B. [red.]. Diagnostyka obrazowa. Podstawy teoretyczne i metodyka badań. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2000
6. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 20 lutego 2007 r. w sprawie podstawowych wymagań dotyczących terenów kontrolowanych i nadzorowanych. DzU z 2007 r. nr 131, poz. 910
7. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 lutego 2011 r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej. DzU z 2011 r. nr 51, poz. 265
8. Rudnicki T., Terlecki J.: Wpływ promieniowania jonizującego na żywy organizm. W: Jaroszyk F. [red.]. Biofizyka. Podręcznik dla studentów. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2007
9. Pasz-Walczak G.: Czynniki rakotwórcze. W: Kordek R. [red.]. Onkologia. Via Medica, Gdańsk 2007
10. Bilski B.: Narażenie na promieniowanie jonizujące w placówkach ochrony zdrowia wraz z podstawowymi zasadami profilaktyki. W: Bilski B. [red.]. Higiena pracy w pielęgniarstwie. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Medycznego, Poznań 2009
11. Papierz S., Kacprzyk J., Kamiński Z., Zmyślony M.: Ocena narażenia zawodowego na promieniowanie rentgenowskie i gamma w Polsce w roku 2010. Med. Pr. 2011;62(6):579–582
12. LADIS IFJ PAN: Dawki otrzymane od promieniowania jonizującego w placówkach medycznych objętych kontrolą dozymetryczną w LADIS IFJ PAN [cytowany 18 stycznia 2011]. Adres: [http://dawki.ifj.edu.pl/wia/mierki\\_2006.pdf](http://dawki.ifj.edu.pl/wia/mierki_2006.pdf)
13. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej: Informacje o wynikach działalności statutowej w 2002–2003 roku [cytowany 2 maja 2011]. Adres: [http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report\\_of\\_clor\\_2002\\_2003.pdf](http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report_of_clor_2002_2003.pdf)
14. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej: Informacja o wynikach działalności statutowej w 2004 roku [cytowany 2 maja 2011]. Adres: [http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report\\_of\\_clor\\_2004.pdf](http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report_of_clor_2004.pdf)

15. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej: Informacja o wynikach działalności statutowej w 2005 roku [cytowany 2 maja 2011]. Adres: [http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report\\_of\\_clor\\_2005.pdf](http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report_of_clor_2005.pdf)
16. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej: Informacja o wynikach działalności statutowej w 2006 roku [cytowany 2 maja 2011]. Adres: [http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report\\_of\\_clor\\_2006.pdf](http://www.clor.waw.pl/publikacje/roczniki/report_of_clor_2006.pdf)
17. Instytut Medycyny Pracy: Ocena narażenia zawodowego na promieniowanie rentgenowskie [cytowany 2 marca 2011]. Adres: [http://old.imp.lodz.pl/zaklady\\_pages/nar\\_zawod\\_n.htm](http://old.imp.lodz.pl/zaklady_pages/nar_zawod_n.htm)
18. Budzanowski M., Kopeć R., Woźniak A.: Raport z pomiarów dawek otrzymany przez pracowników zatrudnionych w narażeniu na promieniowanie jonizujące w medycynie. IFJ PAN, Kraków 2008
19. Hrycek A., Stieber M., Baron J., Szygula J.: Wybrane funkcje neutrofilii krwi obwodowej u pracowników obsługujących aparaturę rentgenowską. *Wiad. Lek.* 1999;52:19–25
20. Staniszevska M.A., Jankowski J.: Narazenie personelu podczas zabiegów radiologii interwencyjnej. *Med. Pr.* 2000;6:563–571
21. Mrena S., Kivela T., Kurttio P., Auvinen A.: Lens opacities among physicians occupationally exposed to ionizing radiation – a pilot study in Finland. *Scand. J. Work Environ. Health* 2011;37(3):237–243. DOI: 10.5271/sjweh.3152
22. Chodick G., Bekiroglu N., Hauptmann M., Alexander B.H., Freedman D.M., Doody M.M.: Risk of cataract after exposure to low doses of ionizing radiation: a 20-year prospective cohort study among US radiologic technologists. *Am. J. Epidemiol.* 2008;168:620–631. DOI: 10.1093/aje/kwn171
23. Jacob S., Michel M., Spaulding C., Boveda S., Bar O., Brezin A.P.: Occupational cataracts and lens opacities in interventional cardiology (O'CLOC study): are X-Ray involved? *BMC Public Health* 2010;10:537. DOI:10.1186/1471-2458-10-537
24. Doody M., Freedman D., Alexander B., Hauptmann M., Miller J.S., Rao R.S.: Breast cancer incidence in U.S. radiologic technologist. *Am. Cancer Soc.* 2006;10:2702–2715. DOI: 10.1002/cncr.21876
25. Doody M.M., Mandel J.S., Linet M.S., Ron E., Lubin J.H., Boice J.D. i wsp.: Mortality among catholic nuns certified as radiologic technologist. *Am. J. Ind. Med.* 2000;37:339–348
26. Berrington A., Darby S.C., Weiss H.A., Doll R.: 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897–1997. *Br. J. Radiol.* 2001;74:507–519
27. Feinendegen L.E.: Evidence for beneficial low level radiation effects and radiation hormesis. *Br. J. Radiol.* 2005;78:3–7. DOI:10.1259/bjr/63353075
28. 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. DOI: 10.2203/dose-response.07-021.Strzelczyk
29. Cuttler J., Pollycove M.: Nuclear Energy and Health and the Benefits of Low-Doses Radiation Hormesis. *Dose Response* 2009;7(1):52–89. DOI:10.2203/dose-response.08-024.Cuttler
30. Jaworowski Z.: Dobroczynne promieniowanie. *Wiedza i Życie* 1997;3:20–29
31. Vaiserman A.: Radiation hormesis: historical perspective and implications for low-dose cancer risk assessment. *Dose Response* 2010;8:172–191. DOI:10.2203/dose-response.09-037.Vaiserman
32. Fornalski K.W., Dobrzyński J., Janiak M.K.: Stochastyczny model odpowiedzi komórek na promieniowanie. *Postępy Tech. Jądr.* 2011;54(3):23–37
33. Luckey T.D.: Physiological benefit from low levels of ionizing radiation. *Health Phys.* 1982;43:771–789
34. Dobrzyński L.: Hormeza. Zjawisko powszechne i powszechnie nieznanne. *Postępy Tech. Jądr.* 2006;49:9–15
35. Calabrese E.: Getting the dose–response wrong: why hormesis became marginalized and the threshold model accepted. *Arch. Toxicol.* 2009;83(3):227–247. DOI: 10.1007/s00204-009-0411-5
36. Monfared A., Hajian H., Hosseini R., Nasir A.: Association between local gamma rays and frequency of cancer in Babol-Iran. *Dose Response* 2010;8:368–377. DOI:10.2203/dose-response.09-011.Monfared
37. Luckey T.D.: Atomic bomb health benefits. *Dose Response* 2008;5:369–382
38. Cardis E., Howe G., Ron E.: Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years after. *J. Radiol. Prot.* 2006;26:127–132
39. Statkiewicz-Sherer M., Visconti P., Ritenour E.: Radiation Protection in Medical Radiography. Mosby, St. Louis (USA) 1998, ss. 124–128
40. Mothersill C., Seymour C.: Radiation-induced bystander effects: Evidence for adaptive response to low dose exposure? *Dose Response* 2006;4(4):283–290. DOI: 10.2203/dose response.06-111.Mothersill
41. Siemiński M.: Szacowanie ryzyka. Zdrowotne skutki niskich dawek promieniowania jonizującego. W: Siemiński M. [red.]. Środowiskowe zagrożenia zdrowia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007
42. Fornalski K.W., Dobrzyński L.: Statystyka otrzymany dawek i chorób nowotworowych wśród pracowników ośrodka jądrowego w Świerku. *Postępy Tech. Jądr.* 2011;54(4):20–32