

ARTYKUŁY

O KONIECZNOŚCI ZMIANY PARADYGMATU OCHRONY RADIOLOGICZNEJ - KOMENTARZ SARI - STOWARZYSZENIA UCZONYCH DLA RZETELNEJ INFORMACJI O PROMIENIOWANIU

(SCIENTISTS FOR ACCURATE RADIATION INFORMATION)

*On the Need to Replace the Present Paradigm
of Radiation Protection - Comments by SARI
(Scientists for Accurate Radiation Information)*

Ludwik Dobrzyński, Marek K. Janiak, Andrzej Strupczewski
Michael Waligórski

Streszczenie: W jednym ze swoich pierwszych aktów wykonawczych, Prezydent Donald Trump zalecił „uwolnienie obywateli Stanów Zjednoczonych od nadmiernie uciążliwych norm i regulacji”. W odpowiedzi, Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) zaapelowała o propozycje, które uczyniłyby regulacje dotyczące ochrony radiologicznej „mniej uciążliwymi”. Stowarzyszenie Uczonych dla Rzetelnej Informacji o Promieniowaniu (SARI) przesłało do EPA swój Komentarz w tej sprawie, w którym proponuje, aby odrzucić hipotezę liniową bez progu dawki (Linear No-Threshold, LNT) jako podstawę przepisów ochrony radiologicznej i zastąpić ją przez hormezę - dobroczynne działanie niskich/o niskiej mocy dawek promieniowania jonizującego, uruchamiających naturalne mechanizmy obronne w organizmie człowieka, głównie poprzez pobudzenie takich reakcji jak usuwanie rodników tlenowych, naprawę DNA i funkcje immunologiczne. Oparcie przepisów ochrony radiologicznej na hormezie radiacyjnej doprowadzi do poprawy zdrowia ogółu ludności i znacznego obniżenia kosztów społecznych ochrony przed promieniowaniem oraz ograniczy negatywne skutki ewentualnych awarii jądrowych. Tekst Komentarza SARI został przetłumaczony, aby umożliwić polskiemu czytelnikowi zapoznanie się z tym krótkim, ale wnikliwym przeglądem proponowanego systemu ochrony radiologicznej, opartego o zjawisko hormezy radiacyjnej, wraz z naukowym uzasadnieniem powodów, dla których należy odrzucić obecny paradygmat tego systemu - hipotezę LNT.

Abstract: By one of his first Executive Orders, President Trump established the “policy of the United States to alleviate unnecessary regulatory burdens placed on the American people.” Acting on this order, the US Environmental Protection Agency (EPA) solicited comments on making radiation protection regulations “less burdensome.” In response, SARI (Scientists for Accurate Radiation Information) submitted to EPA a document proposing that the (Linear No-Threshold, LNT) hypothesis on which radiation protection regulations are presently based should be rejected and replaced by hormesis – the beneficial action of low doses and low dose rates (LDDR) of ionizing radiation, predominantly due to activation of natural defence mechanisms of the body such as scavenging of reactive oxygen species, up-regulation of DNA repair, and boosting of immune reactions. Basing radiation protection regulations on radiation hormesis will benefit the health of the public, significantly decrease the public costs of radiation protection and reduce the adverse impact of any future nuclear accidents. The text of the SARI document has been translated to provide the Polish reader with a brief but comprehensive review of the proposed hormesis-based system of radiation protection and with science-based arguments for rejecting its present LNT paradigm.

Słowa kluczowe: System ochrony radiologicznej, hipoteza LNT, hormezy radiacyjna, niskie dawki i moce dawki (LDDR), reakcje immunologiczne, zdrowie publiczne, zdarzenia radiacyjne, radiofobia

Key words: Radiation Protection System, LNT hypothesis, radiation hormesis, low doses and dose rates (LDDR), immune reactions, public health, nuclear accidents, radiophobia

Wstęp

Jednym z pierwszych aktów podpisanych przez nowo wybranego Prezydenta Stanów Zjednoczonych Donalda Trumpa był Akt Wykonawczy (Executive Order) nr 13777 zalecający „uwolnienie obywateli Stanów Zjednoczonych od nadmiernie uciążliwych norm i regulacji”. Akt ten zobowiązał wszystkie federalne agencje regulacyjne do utworzenia wewnętrznych Zespołów ds. Reformy (Reform Task Forces) dla dokonania przeglądu norm i przepisów tworzonych w tych agencjach, celem wyłonienia „nadmiernie uciążliwych przepisów wymagających wycofania, zmiany lub modyfikacji”. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA - US Environmental Protection Agency), której zadaniem statutowym jest „...ustalenie poprzez rozporządzenia, regulacje lub zalecenia standardów i instrukcji nadzorujących posiadanie i wykorzystywanie materiałów jądrowych i ich pochodnych w sposób jaki [Agencja] uzna za konieczny lub pożądany dla zapewnienia ogólnej obrony i bezpieczeństwa, lub aby ochronić zdrowie oraz ograniczyć zagrożenie dla życia lub posiadanych dóbr.” poleciła podlegającemu jej Urzędowi Atmosfery i Promieniowania (OAR - Office of Air and Radiation) oraz innym podległym jej agencjom wypracowanie zaleceń dla agencyjnego Zespołu ds. Reformy dotyczących m. in. regulacji z zakresu ochrony przed promieniowaniem. Realizując to polecenie, 15 kwietnia 2017 r. OAR zorganizował telekonferencję, w czasie której zgłaszane były wstępne propozycje tych zmian. Ostateczne propozycje należało zgłosić w terminie do 15 maja 2017 r. Wśród wielu propozycji zgłoszonych do EPA, Amerykańskie Towarzystwo Fizyki Medycznej (HPS - Health Physics Society) oraz Stowarzyszenie Uczonych dla Rzetelnej Informacji o Promieniowaniu (SARI - Scientists for Accurate Radiation Information) zaproponowały wprowadzenie istotnych zmian do obowiązujących obecnie amerykańskich przepisów federalnych w zakresie ochrony przed promieniowaniem jonizującym.

Zgłoszone w czasie telekonferencji wstępne uwagi przedstawicieli HPS dotyczyły głównie konieczności zrezygnowania przez EPA ze stosowania w regulacjach dotyczących ochrony radiologicznej modelu liniowo-bezprogowego (LNT - Linear No-Threshold model) oraz uwzględnienia w tych regulacjach obecnej rozbieżności poglądów naukowych co do skutków ekspozycji na dawki niskie oraz o niskiej mocy (LDDR - Low-Dose and Dose-Rate) dla zdrowia człowieka. Przedstawiciele HPS stwierdzili również, że przyjęty obecnie w ochronie radiologicznej model LNT „potęguje obawy społeczne przed wszystkimi rodzajami promieniowania”.

W dokumencie (http://hps.org/documents/epa_hps_regulatory_reform_task_force_2017-05-15.pdf), przesłanym przez HPS do EPA, podano szersze uzasadnienie tych uwag, podkreślając konieczność oparcia przepisów federalnych dotyczących ochrony radiologicznej na aktualnej i w pełni udokumentowanej wiedzy w tym zakresie.

Stowarzyszenie SARI także przesłało swoje propozycje w postaci dość obszernego dokumentu zawierającego syntezę aktualnych poglądów naukowych na temat skutków ekspozycji na dawki niskie oraz o niskich mocach dla zdrowia człowieka. Ten związły, lecz dobrze

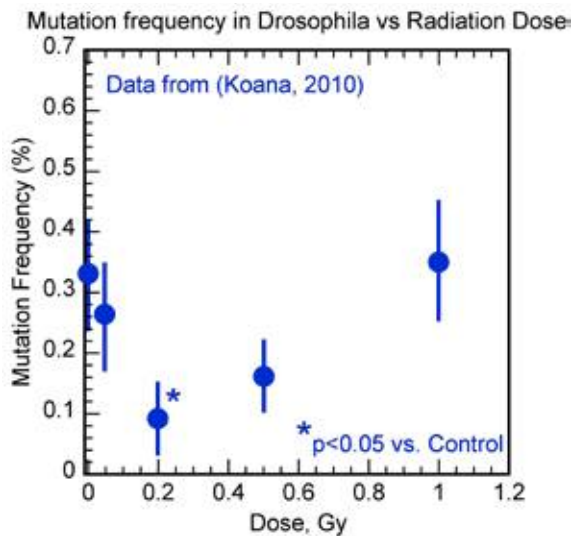
udokumentowany i zilustrowany tekst, ostatecznie zredagowany przez prof. Mohana Dossa (z Fox Chase Cancer Center, Philadelphia, PA, USA), może posłużyć zainteresowanym jako kompendium aktualnej wiedzy na temat skutków i działania na zdrowie człowieka ekspozycji na niskie dawki promieniowania jonizującego. Uzasadnia on tezę, że z zasad ochrony radiologicznej należy usunąć hipotezę LNT jako nie mającą potwierdzenia naukowego, należy zaś za podstawę do wypracowania nowych zasad ochrony radiologicznej przyjmując wielokrotnie wykazane i udokumentowane doświadczalnie zjawisko hormezy radiacyjnej (a więc pozytywnego działania dawek niskich oraz o niskiej mocy). Pełny angielski tekst tego dokumentu znaleźć można na stronie internetowej <http://radiationeffects.org/2017/05/15/radiation-hormesis-should-be-the-basis-for-establishing-radiation-protection-standards/>.

Aby zapoznać polskiego czytelnika z tym ciekawym, prowokacyjnym i kontestującym obecne zasady ochrony radiologicznej tekstem, dokonaliśmy za zgodą prof. Dossa przekładu Komentarza SARI do EPA... na język polski, z pewnymi zmianami i skrótami redakcyjnymi, zachowując oryginalne ilustracje. Uważamy, że tezy stawiane przez grupę ekspertów wchodzących w skład Stowarzyszenia SARI, wśród których obecni są także polscy naukowcy, mogą stać się istotnym przyczynkiem do wypracowania nowych, lepszych zasad ochrony radiologicznej.

Komentarz SARI do EPA (z 15 maja 2017 r.): Hormeza radiacyjna powinna stać się podstawą norm ochrony radiologicznej

Hipoteza, że skutki oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm człowieka opisywane są przez model liniowo-bezprogowy LNT jest obecnie przyjętą na całym świecie podstawą przepisów ochrony radiologicznej. Hipotezę LNT akceptuje Amerykańska Akademia Nauk [NRC, 2006], a także większość instytucji krajowych i międzynarodowych odpowiedzialnych za ochronę radiologiczną i bezpieczeństwo jądrowe. Podstawowe założenia, na których oparta jest hipoteza LNT – że prawdopodobieństwo rozwoju nowotworu popromiennego jest wprost proporcjonalne do dawki pochłoniętego promieniowania i że nawet przy najniższych dawkach jest ono większe od zera (czyli, że nie ma progów dawki, poniżej którego to prawdopodobieństwo jest zerowe) – nie są jednak słuszne. Wprawdzie ekspozycja na niskie dawki promieniowania może doprowadzić do powstania pewnych zmian w DNA, prowadzi ona jednak także do pobudzenia mechanizmów obronnych w organizmie człowieka, np. wytworzenia antyoksydantów czy enzymów naprawczych DNA [Feinendegen i in. 2013]. Pobudzenie mechanizmów obronnych organizmu prowadzi do redukcji endogennych uszkodzeń DNA, co ostatecznie ogólnie ogranicza liczbę tych uszkodzeń oraz mutacji [Koana i Tsujimura 2010] (zob. rys. 1). Ponadto model nowotworzenia oparty na mutacjach somatycznych – na podstawie którego hipoteza LNT przewiduje wzrost

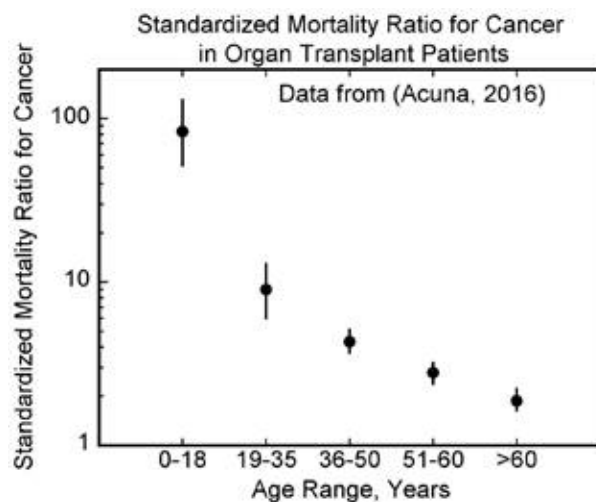
zapadalności na nowotwory w wyniku napromienienia niskimi dawkami – nie znajduje potwierdzenia doświadczalnego, hipoteza LNT nie ma więc naukowego uzasadnienia [Doss 2016].



Rys 1. Wpływ niskich dawek promieniowania na częstotliwość mutacji (Mutation Frequency) w komórkach muszki *Drosophila melanogaster*. Dane wg Koana i Tsujimura (2010)

Figure 1. The effect of low-dose radiation on mutations in *Drosophila melanogaster*. Data from Koana and Tsujimura (2010)

Zaobserwowano na przykład, że w populacjach młodych pacjentów (w wieku od 0 do 18 lat), u których dokonano przeszczepu narządów (konieczne jest wtedy farmakologiczne osłabienie ich układu odpornościowego), umieralność na nowotwory jest ok. 80 razy wyższa niż w grupie kontrolnej [Acuna i in. 2016], (zob. rys. 2).

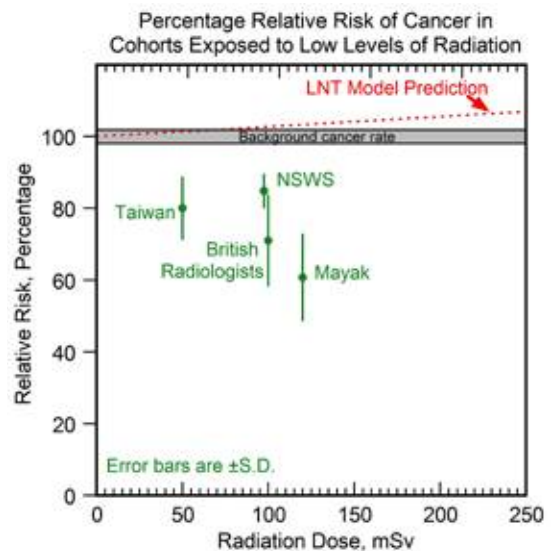


Rys. 2. Standaryzowany współczynnik umieralności na nowotwory (Standardized Mortality Ratio for Cancer) w funkcji wieku (Age Range) u pacjentów, którym przeszczepiono narządy. Dane wg Acuna i in. (2016)

Figure 2. Standardized mortality ratio (SMR) for cancers as a function of age in organ transplant recipients. Data from Acuna et al. (2016)

Czy można uzasadnić tę dramatyczną zmianę współczynnika umieralności poprzez mutacyjny model kancerogenezy? Nie. A skoro model mutacyjny nie może wytłumaczyć tego wzrostu, model ten także należy odrzucić. Również z tego względu hipoteza LNT, oparta na mutacyjnym modelu kancerogenezy, nie może być słuszna, powinna więc być odrzucona.

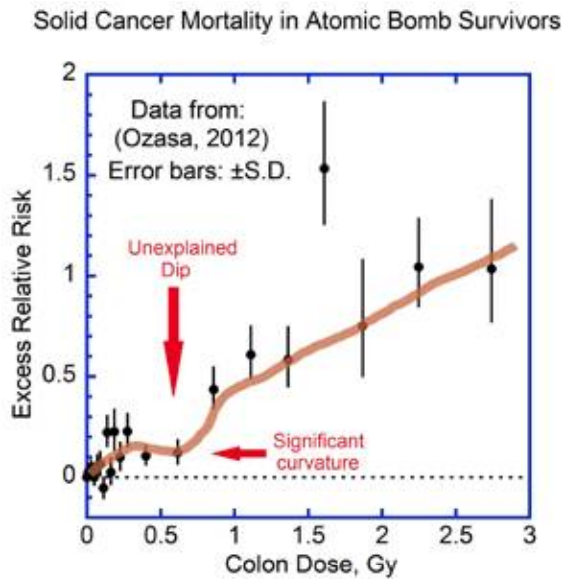
Z drugiej strony, na podstawie wielu obserwacji, potwierdza się rola układu odpornościowego (nadzoru immunologicznego) w procesie kancerogenezy [Doss 2016]. A ponieważ niskie dawki promieniowania pobudzają układ odpornościowy [Yang i in. 2014], można oczekiwać spadku zachorowalności na nowotwory – zjawiska określanego jako hormeza radiacyjna - którą istotnie zaobserwowano w wielu populacjach osób poddanych świadomie lub przypadkowo działaniu niskich lub o niskiej mocy dawek promieniowania jonizującego [Kostyuchenko and Krestinina 1994, Berrington i in. 2001, Sponsler i Cameron 2005, Hwang i in. 2006, Doss 2016] (zob. rys. 3).



Rys. 3. Względne ryzyko (Relative Risk, wyrażone w procentach) zachorowania na nowotwór w populacjach osób narażonych na działanie niskich dawek promieniowania, w funkcji dawki

Mayak – ewakuowani mieszkańcy wsi w sąsiedztwie kompleksu produkcji plutonu Majak, British Radiologists – radiolodzy brytyjscy, którzy rozpoczęli swoją pracę w latach 1955-1978, Taiwan – mieszkańcy skażonych radiacyjnie budynków w Tajpej na Tajwanie, NSWS – robotnicy narażeni na promieniowanie w stoczni atomowych okrętów podwodnych Shippingport, USA, objęci badaniem Nuclear Shipyard Worker Study. We wszystkich tych populacjach względne ryzyko zachorowania na nowotwór było niższe niż w równoważnych populacjach kontrolnych nie poddanych działaniu promieniowania. Dane z analizy Dossa (2016) prac: Kostyuchenko i Krestinina (1994), Berrington i in. (2001), Sponsler i Cameron (2005), Hwang i in. (2006).

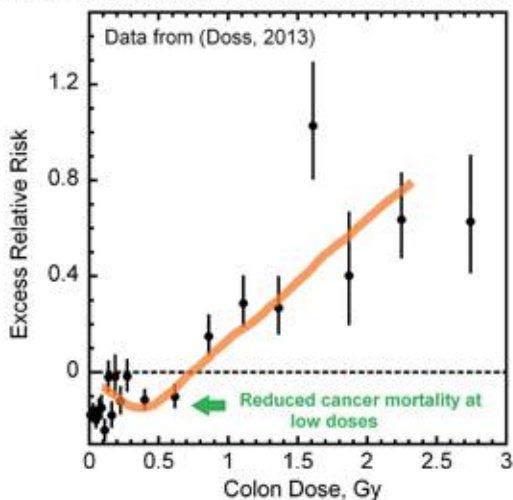
Figure 3. Percentage relative risk of cancer in population groups exposed to low-dose radiation versus radiation dose. Data labels: Mayak - evacuated residents of villages near Mayak Nuclear Weapons Facility, British Radiologists - British radiologists who entered service during the period 1955 to 1979, Taiwan - residents of radio-contaminated apartment buildings in Taiwan, NSWS - radiation workers in Nuclear Shipyard Worker Study. All the cohorts showed reduced risk of cancer compared to equivalent control populations not subjected to the radiation exposures. Data from Kostyuchenko and Krestinina (1994), Berrington et al. (2001), Sponsler and Cameron (2005), and Hwang et al. (2006), as analysed by Doss (2016).



Rys. 4. Nadmiarowe ryzyko względne (ERR) umieralności na nowotworowe guzy łagodne (Solid Cancer Mortality) w populacji, która przeżyła wybuchy atomowe w Hiroshimie i Nagasaki (ABS), w funkcji dawki na jelito grube. Dane według Ozasa i in. (2012). Unexplained Dip – niezrozumiały ubytek, Significant Curvature – istotna krzywizna

Figure 4. Excess relative risk (ERR) for all solid cancer mortality in atomic bomb survivors in relation to radiation exposure. Data from Ozasa et al. (2012)

Atomic Bomb Survivor Solid Cancer Mortality (Ozasa, 2012)
Corrected for -20% assumed bias in baseline cancer mortality rate

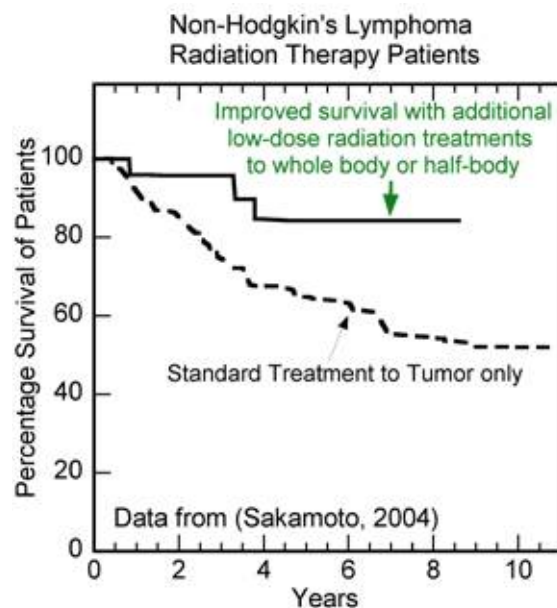


Rys. 5. Nadmiarowe ryzyko względne (ERR) umieralności na nowotworowe guzy łagodne w populacji ABS, w funkcji dawki na jelito grube - dane według pracy Ozasa i in. (2012), skorygowane poprzez podwyższenie o 20% poziomu odniesienia ERR. Dane wg Doss (2012). Reduced cancer mortality at low doses – obniżenie umieralności w zakresie niskich dawek

Figure 5. Excess relative risk (ERR) for all solid cancer mortality in atomic bomb survivors corrected for -20% bias in baseline cancer mortality rate plotted as a function of colon dose. Data from Doss (2012)

Dane dotyczące populacji ABS (Atomic Bomb Survivors), która przeżyła wybuchy bomb atomowych w Hiroshimie i Nagasaki są powszechnie uznawane za najważniejsze źródło informacji o skutkach zdrowotnych promieniowania jonizującego. Tradycyjnie,

analiza tych danych zawsze polegała na dopasowaniu wartości liniowego współczynnika modelu LNT do danych epidemiologicznych. Uzyskuje się w ten sposób liniową i bezprogową zależność od dawki nadmiarowego ryzyka względnego (ERR-Excess Relative Risk) umieralności na choroby nowotworowe [Ozasa i in. 2012]. Jednak w obszarze dawek od 0,3 do 0,7 Gy uzyskane z danych epidemiologicznych ryzyko względne jest znacząco niższe od przewidywań modelu LNT (zob. rys. 4). Oznacza to, że model LNT, dopasowany do danych epidemiologicznych dotyczących populacji ABS w całym zakresie dawek, źle opisuje te dane w obszarze dawek niskich.



Rys. 6. Czas przeżycia chorych w I i II stadium chłoniaka nieziarniczego (Non-Hodgkin's lymphoma) z guzami morfologicznie w stopniu pośrednim i zaawansowanym poddanych radioterapii miejscowej (linia przerywana) oraz po uzupełniających ekspozycjach całego lub połowy ciała na niskie dawki promieniowania (linia ciągła). Dane według Sakamoto (2004)

Figure 6. Survivals of patients with non-Hodgkin's lymphoma of stage I and II and with histologically intermediate and high-grade tumors, treated by the combined treatment or by local irradiation. Data from Sakamoto (2004)

Model LNT nie zapewnia spójnego opisu danych epidemiologicznych dotyczących populacji ABS, powinien więc zostać odrzucony. W pracy Ozasa i in. (2012), dopasowując parametry modelu LNT do danych epidemiologicznych użyto danych z zakresu najniższych dawek jako poziomu odniesienia, wykorzystując następnie ten poziom do dalszej oceny nadmiarowego względnego ryzyka umieralności, ERR¹. Jeśli jednak uwzględnimy obserwowane zmniejszenie o 20% częstości umieralności na nowotwory w grupach, które otrzymały niskie dawki w zakresie

¹ Nadmiarowa względna umieralność na nowotwory (Excess Relative Risk), $ERR = (R-B)/B$, gdzie R i B to umieralność na nowotwory odpowiednio w grupie napromieniowanej R i grupie kontrolnej (niemieniowanej) B.

do 0,5 Gy, można uznać, że do analizy przyjęty został zaniżony o 20% poziom odniesienia, co rzutuje na obliczone wartości ERR w zakresie dawek wyższych. W wyniku korekty poziomu odniesienia przez jego podwyższenie o wspomniane 20% otrzymuje się w obszarze niskich dawek klasyczny przebieg hormetyczny, tj. zależność efekt-dawka o kształcie litery J [Doss 2012, Doss 2013], (zob. rys. 5). Analityczne wyprowadzenie powyższej korekty można znaleźć w pierwszej z tych prac [Doss, 2012].

Poprzez wielokrotne uzupełniające ekspozycje całego ciała chorych z nowotworami na niskie dawki promieniowania X lub gamma uzyskano okresy ich przeżycia porównywalne lub lepsze niż przy zastosowaniu standardowego leczenia radioterapią lub chemioterapią [Chaffey i in. 1976, Sakamoto 2004, Pollycove 2007]. Przykład znaczącej poprawy przeżywalności pacjentów z chłoniakiem nieziarniczym leczonych uzupełniająco przez wielokrotne napromienianie całego lub połowy ciała niskimi dawkami promieniowania X lub gamma, w porównaniu z wynikami ich klasycznego leczenia skojarzonego, metodami radioterapii i chemioterapii, ilustruje rys. 6 [Sakamoto 2004].

Należy podkreślić, że występowanie hormezy radiacyjnej zostało już wielokrotnie potwierdzone. W roku 1980 prof. Luckey zaproponował wykorzystanie hormezy jako sposobu zapobiegania chorobom nowotworowym [Luckey 1980]. Metody tej nie można było jednak zastosować u chorych w badaniach prospektywnych ze względu na powszechne przekonanie o słuszności nigdy przecież niezwyfikowanej hipotezy LNT oraz przyjęcie wynikającej z niej zasady ALARA (*As Low as Reasonably Achievable* - tak nisko jak to rozsądnie osiągalne), dotyczącej ekspozycji człowieka na promieniowanie jonizujące. Globalnie, liczba zgonów z powodu nowotworów wynosi ok. 7,6 miliona/rok. Przyjmując możliwość zredukowania liczby tych zgonów o 10% w wyniku hormetycznego działania niskich dawek promieniowania jonizującego, można by w okresie ostatnich dwu dekad zapobiec około 15 milionom zgonów chorych z nowotworami [Doss, 2014]. Biorąc pod uwagę dotychczasowy brak postępu w redukcji liczby tych zgonów przez ostatnie półwiecze (Murphy i in. 2015), można uznać, że to właśnie z powodu nieuzasadnionego przekonania o słuszności hipotezy LNT nie skorzystano z powyższej możliwości uzyskania znaczącego postępu w walce z chorobami nowotworowymi.

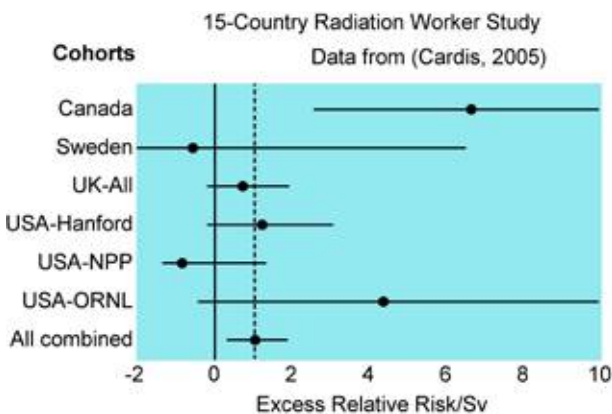
Ponadto, powszechnie odczuwany lęk przed promieniowaniem (radiofobia), wynikający m. in. z często przytaczanych (nawet w środowiskach naukowych) ogromnych liczb hipotetycznych zgonów w wyniku ekspozycji populacji osób na niskie dawki (obliczanych na podstawie modelu LNT i dawek kolektywnych), powoduje znaczące straty materialne poprzez nieuzasadnione koszty nadmiernych zabezpieczeń źródeł promieniowania jonizującego. Tymczasem, to radiofobia oraz nadmiernie zaniżone po-

ziomy obowiązujących limitów dawek niepotrzebnie doprowadziły do wielu rzeczywistych zgonów spowodowanych przez ewakuowanie w trybie administracyjnym setek tysięcy osób po awariach reaktorów przemysłowych w Czarnobylu i Fukushima [Ichiseki 2013]. Dalszych strat będących wynikiem radiofobii i uznawania hipotezy LNT jako podstawy przepisów ochrony radiologicznej można uniknąć modyfikując te przepisy zgodnie z aktualną wiedzą na temat skutków ekspozycji na promieniowanie dla zdrowia człowieka. Nowe regulacje powinny uwzględnić zjawisko hormezy radiacyjnej występujące w obszarze dawek niskich oraz o niskiej mocy.

Pomimo przekonujących powodów dla odrzucenia modelu LNT, argumentem za dalszym jego stosowaniem, często podawanym przez regulatorów oraz profesjonalne instytucje i towarzystwa naukowe zajmujące się ochroną radiologiczną, jest niemal powszechna akceptacja hipotezy LNT przez narodowe i międzynarodowe komitety eksperckie. Jednak, jeśli bliżej przyjrzeć się działalności tych komitetów, wyraźnie widać, że nie wywiązują się one należycie ze swoich zadań - akceptują bowiem bezkrytycznie publikacje promujące model LNT, zaś pomijają lub odrzucają prace które model ten kwestionują. Dla przykładu, w raporcie Komitetu BEIR VII Amerykańska Akademia Nauk bezkrytycznie zaakceptowała publikację dotyczącą pracowników z 15 krajów, zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące [Cardis i in. 2005], choć przytoczone w tej pracy dane dla kohorty kanadyjskiej znacząco odbiegały od wyników uzyskanych w innych krajach (zob. rys. 7). Wykluczenie z analizy danych kanadyjskich diametralnie zmieniłoby ostateczny wniosek tej pracy - o występowaniu znaczącego ryzyka zapadalności na nowotwory przy narażeniu zawodowym na niskie dawki promieniowania jonizującego. Zamiast jednak zasugerować autorom tej meta-analizy, aby dokładniej zbadali budzące wątpliwości dane kanadyjskie, w specjalnym dodatku do swojego raportu BEIR VII, Komitet ten przytoczył wnioski z pracy Cardis i in., autorytatywnie stwierdzając występowanie ryzyka związanego z działaniem niskich dawek promieniowania jonizującego. Kilka lat po opublikowaniu raportu BEIR VII, Kanadyjska Komisja Bezpieczeństwa Jądrowego zakwestionowała dane kanadyjskie ze względu na poważne błędy metodyczne tego badania [CNSC 2011], co w wyniku decyzji tejże Komisji rzeczywiście całkowicie odmieniło wnioski ze wspomnianego wyżej studium Cardis i in. [Zablotska i in. 2004]. Komitet BEIR dotąd nie ustosunkował się do tej zmiany.

Ponadto, w Raporcie BEIR VII całkowicie pominięto dyskusję na temat roli jaką odgrywa układ odpornościowy w zapobieganiu chorobom nowotworowym, a także pobudzającego wpływu niskich dawek promieniowania na ten układ, pomimo wielu publikacji dotyczących tych zagadnień, dostępnych w czasie opracowywania tego raportu [Doss 2016]. Komitet

BEIR nie uwzględnił także wielu danych wskazujących, że narażenie na niskie dawki promieniowania oraz na niskie moce dawki nie powoduje wzrostu zachorowalności na nowotwory, a często ją zmniejsza, co przeczy modelowi LNT [Frigerio i in. 1973, Chaffey i in. 1976, Choi i in. 1979, Rowland i in. 1983, Miller i in. 1989, Kostyuchenko i Krestinina 1994, Howe i McLaughlin 1996, Berrington i in. 2001, Sakamoto 2004, Sponsler i Cameron 2005]. Inne komitety eksperckie i ciała doradcze, w tym ICRP, UNSCEAR, IAEA, WHO, czy NCRP, nie dokonały krytycznej analizy raportu BEIR VII, w dalszym ciągu mniej lub bardziej otwarcie popierając model LNT.



Rys. 7. Nadmiarowe ryzyko względne (*Excess Relative Risk/Sv*) zachorowalności na wszystkie nowotwory (z wyjątkiem białaczek) w przeliczeniu na 1 Sv, w populacjach, w których liczba zgonów przekroczyła 100. Dane według Cardis i in. (2005)

Figure 7. Excess relative risks per Sv for all cancer excluding leukemia in cohorts with more than 100 deaths. Data from Cardis et al. (2005)

Z powyższego wynika, że uznając jakość pracy wymienionych komitetów eksperckich i ciał doradczych za niezadowalającą, Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) powinna samodzielnie dokonać analizy wiarygodnych i opublikowanych danych i sama wyciągnąć wnioski co do wpływu niskich dawek na zapadalność na nowotwory. Zadanie to wymaga wnikliwej analizy opublikowanych badań, ponieważ w wielu doniesieniach popierających model LNT można znaleźć podstawowe uchybienia metodologiczne w podejściu do tego tematu, a także błędy w analizie i interpretacji danych. Bezskrytyczna akceptacja, a także tendencyjna selekcja publikacji, często metodologicznie i naukowo wątpliwych, pozwala komitetom eksperckim i doradczym dalej podtrzymywać model LNT z zachowaniem pozorów naukowej bezstronności - z pominięciem wielu opublikowanych prac wskazujących na występowanie hormezy radiacyjnej w obszarze niskich dawek. EPA powinna zażądać od tych komitetów i ciał doradczych uzasadnienia stosowalności modelu LNT w świetle aktualnych danych i poglądów naukowych wyraźnie kwestionujących słuszność tego modelu. Jeżeli okaże się niemożliwe wykazanie, że dane kwe-

stionujące hipotezę LNT nie mają uzasadnienia naukowego, ani też że hipoteza LNT posiada naukowe uzasadnienie, EPA powinna zrezygnować ze stosowania hipotezy LNT jako podstawy przepisów ochrony radiologicznej, zalecanych przez tę agencję².

Wprowadzenie hormezy radiacyjnej jako naukowej podstawy przepisów, ochrony radiologicznej znacznie uprości te przepisy, ponieważ zgodnie z tym założeniem, ekspozycje na niskie dawki nie wywołują uszczerbku na zdrowiu. Nie ma więc potrzeby limitowania tych dawek do zadanego progu. W przypadku dawek wysokich, które mogą działać kancerogennie, należy wprowadzić przepisy zapobiegające ekspozycjom na takie dawki. Poniżej opisano kilka przykładów możliwych rozwiązań.

W przypadku ekspozycji jednorazowych lub krótkotrwałych, dane z populacji ABS wskazują, że nadmiarowe ryzyko zachorowalności na nowotwory nie wzrasta przy dawkach indywidualnych nie przekraczających progu ok. 0,75 Gy (rys. 5). Przy ekspozycjach jednorazowych należy więc zapobiegać możliwości otrzymania dawki przekraczającej tę wartość progową. Przyjmując współczynnik bezpieczeństwa równy 5, wytyczne ochrony radiologicznej powinny więc zalecać ograniczenie ekspozycji indywidualnych do dawek poniżej 0,15 Gy. Przy tak wysokim współczynniku bezpieczeństwa, wymieniona wartość dawki nie powinna być traktowana jako nieprzekraczalny „limit dawki”, ponieważ niewielkie jej przekroczenie nie spowoduje wzrostu prawdopodobieństwa wystąpienia radiogennej choroby nowotworowej.

Co do rozłożonych w czasie ekspozycji na promieniowanie jonizujące, łączna dawka 1,5 Gy podana na całe ciało lub jego połowę w ciągu 5 tygodni równoległe z typową procedurą radioterapeutyczną (zlokalizowaną w obszarze leczonym) prowadzi do wydłużenia czasu przeżycia chorych, w porównaniu ze standardową zlokalizowaną radioterapią nowotworową [Sakamoto 2004] (zob. rys. 6). Natomiast ekspozycja na dawki promieniowania powyżej 2 Gy w okresie 5 tygodni prowadzi do wzrostu zachorowalności na białaczkę [Travis i in. 1996]. Należy więc ograniczyć możliwość otrzymania dawki indywidualnej przekraczającej 2 Gy w ciągu 5 tygodni. Ponownie przyjmując współczynnik bezpieczeństwa równy 5, należy do przepisów ochrony radiologicznej wprowadzić zalecenie, aby indywidualne dawki pochłonięte w okresie 5 tygodni nie przekraczały 0,4 Gy. Również i w tym przypadku, ze względu na wysoki współczynnik bezpieczeństwa, powyższa wartość dawki nie powinna być traktowana jako nieprzekraczalny „limit dawki”, ponieważ niewielkie jej przekroczenie nie spowoduje wzrostu zagrożenia chorobą nowotworową.

Stosując tego rodzaju podejście, w oparciu o wiarygodne i udokumentowane dane i po przyjęciu

² Obecnie Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej nie kwestionuje poglądu, że hipotezie LNT brak podstawy naukowej, uważa jednak, że model LNT jest użyteczny dla celów ochrony radiologicznej

odpowiednich wartości współczynników bezpieczeństwa, należy ustalić takie wytyczne ochrony radiologicznej dotyczące ekspozycji długoczasowej, aby z zadany współczynnikiem bezpieczeństwa nie przekroczyć poziomów, o których wiadomo, że powodują wzrost prawdopodobieństwa rozwoju radiogenego nowotworu.

Zaproponowane tu podejście – czyli rezygnacja z regulowania ekspozycji w obszarze dobroczynnych w skutkach niskich dawek promieniowania jonizującego, lecz z zapewniającymi bezpieczeństwo wytycznymi, aby nie przekraczać zalecanych wysokich poziomów dawek indywidualnych – może wydawać się radykalnym odejściem od obecnych regulacji opartych na modelu LNT, które ograniczają ekspozycje nawet na najniższe dawki promieniowania jonizującego, a także stawiają nadmierne wymagania co do licencjonowania, nadzoru czy dokumentowania tych ekspozycji. Jednak, poprzez analogię do ogólnie dostępnych rodzajów leków stosowanych w medycynie widać, że powyższa propozycja, oparta na hormezie radiacyjnej, jest całkowicie zgodna z przyjętymi zasadami stosowania tych leków. Podobnie jak w przypadku hormezy radiacyjnej, leki podawane w małych dawkach działają leczniczo, zaś w wysokich – mogą być szkodliwe. Dla ogólnie dostępnych środków farmakologicznych nie określa się ściśle limitów ich dawkowania, nie reguluje się także ich sprzedaży (np. przez ich dostępność jedynie na receptę i wyłącznie w aptece), zalecając jedynie aby nie przekraczać pewnych dawek, np. w postaci: „nie zżyj więcej niż 10 tabletek w okresie 24 godzin”. Do sprzedaży leków ogólnie dostępnych nie jest wymagana ani specjalna licencja na ich produkcję ani recepta od lekarza, nie rejestruje się też ani nie kontroluje liczby wydanych tabletek. Nie jest także wymagany indywidualny nadzór nad zazywaniem leków tego rodzaju.

Ponieważ zakres niskich dawek promieniowania jonizującego, pochłonięcie których może działać korzystnie dla zdrowia, leży daleko niżej od dawek związanych z podwyższonym ryzykiem wystąpienia radiogenych nowotworów, możliwość, że przy wykorzystywaniu hormetycznych właściwości promieniowania przekroczone zostaną progi dawek skutkujące wzrostem zachorowalności na nowotwory jest bardzo mało prawdopodobna. Z tego względu nie ma potrzeby wprowadzania rozbudowanych przepisów ochrony radiologicznej dla zakresu niskich dawek. Jednak w sytuacjach, w których możliwe byłoby pochłonięcie dawki na tyle wysokiej, że skutkowałaby możliwym i naukowo uzasadnionym wystąpieniem radiogenych nowotworów, należy zalecać ostrożność i wprowadzić w przepisach ochrony radiologicznej regulacje zabezpieczające przed potencjalnym uszczerbkiem na zdrowiu w wyniku takich ekspozycji.

Kto mógłby podjąć się opracowania nowych przepisów opartych na zasadzie hormezy radiacyjnej? Przyjęcie hormezy radiacyjnej jako podstawy

przepisów ochrony radiologicznej oznacza tak radykalną zmianę ich podstawowego paradygmatu, że nowe przepisy powinni raczej opracować eksperci umiejący dokonać bezstronnej, rzetelnej i naukowej analizy dostępnych danych doświadczalnych, nie będąc przy tym obciążeni dotychczasowym paradygmatem, czyli hipotezą LNT.

Jak się wydaje, przyjęcie przepisów ochrony przed promieniowaniem opartych na akceptacji zjawiska hormezy radiacyjnej doprowadzi do usunięcia obecnie obowiązującego nadmiaru regulacji wynikających z przyjęcia hipotezy LNT i w znacznym stopniu zredukuje koszty oraz liczbę osób związanych z egzekwowaniem tych przepisów. W obliczu dotychczasowego ogromnego marnotrawstwa środków, spowodowanego wieloletnim stosowaniem zasad ochrony radiologicznej opartych na modelu LNT, które nie przyniosły społeczeństwu żadnych wymiernych korzyści, takie zmiany są jak najbardziej pożądane. Przyjęcie nowych regulacji pozwoli uświadomić społeczeństwu i osobom zawodowo narażonym na promieniowanie jonizujące praktyczny brak zagrożenia związanego z ekspozycją na niskie dawki, co istotnie zmieni społeczne odczucie zagrożenia radiacyjnego – łagodząc radiofobię. W przypadkach nieuniknionych w przyszłości zdarzeń lub awarii reaktorowych, w których dochodzi do uwolnień promieniowania jonizującego do środowiska, zaburzenia społeczne spowodowane koniecznymi, być może w tych przypadkach, lokalnymi przesiedleniami oraz decyzjami regulującymi powroty ludności do ich domów – będą wtedy daleko łagodniejsze. Wyciągnięte zostaną wreszcie wnioski z katastrofalnych skutków społecznych (a nie radiacyjnych) awarii w Czarnobylu lub Fukushima, spowodowanych w dużej mierze decyzjami administracyjnymi wymuszonymi przepisami opartymi o model LNT. Złagodzenie ograniczeń w stosowaniu niskich dawek promieniowania jonizującego umożliwi także prowadzenie badań i prób klinicznych w tym zakresie dawek u ludzi, co przyczyni się do opracowania i wdrożenia nowych metod zapobiegania i leczenia wielu schorzeń, w tym uogólnionych nowotworów, choroby Alzheimera [Wei i in. 2012], choroby Parkinsona [El Ghazaly i in. 2013] i innych, na które obecnie brak skutecznego lekarstwa.

Podsumowując, włączenie do przepisów ochrony przed promieniowaniem zjawiska hormezy radiacyjnej przyniesie znaczne korzyści dla zdrowia publicznego, umożliwiając przeprowadzenie badań klinicznych nad zastosowaniem ekspozycji na niskie dawki promieniowania przy zapobieganiu i leczeniu chorób obecnie nieuleczalnych, a także doprowadzi do radykalnego zmniejszenia kosztów ochrony radiologicznej i ograniczy skutki społeczne potencjalnych awarii radiacyjnych lub jądrowych. Dlatego też proponowane zmiany powinny być wprowadzone bezzwłocznie, aby jak najszybciej wyeliminować ujemny wpływ obecnie obowiązujących przepisów, opartych na paradygmacie hipotezy LNT.

Polscy uczeni w stowarzyszeniu SARI

Polscy członkowie SARI uczestniczyli w redakcji powyższego tekstu. Pełny tekst **Komentarza SARI do EPA...**, podpisany przez 17 sygnatariuszy będących członkami tego stowarzyszenia (<http://radiationeffects.org/>) lub także członkami Fundacji XLNT (<https://www.x-lnt.org/>), w tym przez trzy osoby z Polski, został w dniu 15 maja 2017 r. przekazany do US Environmental Protection Agency.

Stowarzyszenie Uczonych dla Rzetelnej Informacji o Promieniowaniu – SARI, działające głównie jako forum internetowe, jako swoją misję przyjęło „*monitorowanie i zapobieganie nierzetelnej informacji dotyczącej zagadnień jądrowych i promieniowania jonizującego, która może mieć ujemny wpływ na skuteczną odpowiedź na wyzwania związane z tymi zagadnieniami, w szczególności z ochroną życia.*” Stowarzyszenie liczy obecnie około 100 członków, głównie naukowców, ekspertów i dziennikarzy ze Stanów Zjednoczonych, ale także z innych krajów, w tym siedmiu naukowców z Polski. Polsky uczeni aktywnie uczestniczą w działalności SARI, ich głos jest zauważany i ceniony. Wspólnie z innymi członkami tego stowarzyszenia podejmują inicjatywy związane m. in. z komentowaniem prac z dziedziny badań radiacyjnych jawnie sprzeniewierzającym się zasadom pracy naukowej. Tematyka zainteresowań badawczych i niektórych publikacji polskich członków SARI i ich współpracowników (np. Dobrzyński 2012, 2015, 2016, Fornalski 2010, 2011, 2012, 2012a, 2013, Janiak 2017, Nowosielska 2006, 2010, 2012, Reszczyńska 2017, Strupczewski 2010, 2015, 2016, Waligórski 2003, 2015) dobrze wpisuje się w ogólny obszar działalności i tematów, którymi zajmuje się SARI. Należy tu przypomnieć szczególny wkład prof. Zbigniewa Jaworowskiego w uznanie i akceptację zjawiska hormezy jako podstawy ochrony radiologicznej (Jaworowski 1999). Już w początkach lat osiemdziesiątych, jako Przewodniczący Komitetu Narodów Zjednoczonych ds. Promieniowania Jądrowego (UNSCEAR), prof. Jaworowski doprowadził do opracowania i opublikowania przez ten Komitet dokumentu *Adaptive responses to radiation in cells and organisms* (UNSCEAR 1994). Profesor Jaworowski czynnie uczestnicząc w międzynarodowych zespołach eksperckich wskazujących na brak uzasadnienia dla stosowania hipotezy LNT w przewidywaniu skutków promieniowania jonizującego, o wiele lat wyprzedził obecną dyskusję na ten temat (Dobrzyński 2012).

Zagadnieniem wpływu na organizm człowieka ekspozycji na niskie dawki promieniowania jonizującego zajmuje się także obecnie wiele konsorcjów finansowanych przez Komisję Europejską (np. MELODI, www.melodi-online.eu), w skład których wchodzi także polskie zespoły badawcze. Należy więc sądzić, że pomimo znaczących trudności, krok po kroku nieadekwatność hipotezy LNT do opisu rzeczywistości dociera do świadomości coraz większej liczby uczonych. Autorzy niniejszego opracowania mają nadzieję,

że przedstawiony powyżej tekst komentarza SARI do EPA, uzasadniający przyjęcie zjawiska hormezy radiacyjnej jako lepszej niż LNT podstawy dla norm ochrony radiologicznej, znajdzie oddźwięk i pobudzi dyskusję wśród polskich ekspertów i specjalistów w tej dziedzinie, a także zachęci ich do czynnego uczestniczenia w dalszych pracach i dyskusjach prowadzonych w krajowych i zagranicznych towarzystwach naukowych, a także na forum stowarzyszenia SARI.

prof. dr hab. Ludwik Dobrzyński,
Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
Otwock-Świerk
prof. dr hab. n. med. Marek K. Janiak,
Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii,
Warszawa
prof. NCBJ dr inż. Andrzej Strupczewski,
Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
Otwock-Świerk
prof. dr hab. Michael Waligórski,
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
Kraków,
Centrum Onkologii Oddział w Krakowie

Literatura:

- [1] Acuna, S.A., Fernandes, K.A., Daly, C. & et al. 2016. Cancer mortality among recipients of solid-organ transplantation in Ontario, Canada. *JAMA Oncology*, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1001/jamaoncol.2015.5137>
- [2] Berrington, A., Darby, S.C., Weiss, H.A. & Doll, R. 2001. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897-1997. *Br J Radiol*, 74, 507-19. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11459730>
- [3] Cardis, E., Vrijheid, M., Blettner, M., Gilbert, E., Hakama, M., Hill, C., Howe, G., Kaldor, J., Muirhead, C.R., Schu-bauer-Berigan, M., Yoshimura, T., Bermann, F., Cowper, G., Fix, J., Hacker, C., Heinmiller, B., Marshall, M., Thierry-Chef, I., Utterback, D., Ahn, Y. O., Amoros, E., Ashmore, P., Auvinen, A., Bae, J.M., Solano, J. B., Biau, A., Combalot, E., Deboodt, P., Diez Sacristan, A., Eklof, M., Engels, H., Engholm, G., Gulis, G., Habib, R., Holan, K., Hyvonen, H., Kerekes, A., Kurtinaitis, J., Malker, H., Martuzzi, M., Mastauskas, A., Monnet, A., Moser, M., Pearce, M., Richardson, D. B., Rodriguez-Artalejo, F., Rogel, A., Tardy, H., Telle-Lamberton, M., Turai, Usel, M. & Veress, K. 2005. Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries. *The BMJ*, 331, 77 <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15987704>
- [4] Chaffey, J.T., Rosenthal, D.S., Moloney, W.C. & Hellman, S. 1976. Total body irradiation as treatment for lymphosarcoma. *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*Physics*, 1, 399-405. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/823140> Choi, N.C., Timothy, A.R., Kaufman, S.D., Carey, R.W. & Aisenberg, A.C. 1979. Low dose fractionated whole body irradiation in the treatment of advanced non-Hodgkin's lymphoma. *Cancer*, 43, 1636-42. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/582159>

- [5] CNSC 2011. *Verifying Canadian Nuclear Energy Worker Radiation Risk: A Reanalysis of Cancer Mortality in Canadian Nuclear Energy Workers (1957-1994), Summary Report, INFO-0811* [Online]. Canadian Nuclear Safety Commission. http://nuclearsafety.gc.ca/pubscatalogue/uploads/INFO0811_e.pdf [odczytane 11.05.2017]
- [6] Dobrzyński, L., Waligórski, M.P.R. & Janiak, M.K. 2012. Professor Zbigniew Jaworowski - In Memoriam, *Dose Response* 10 (2012), DOI: 10.2203/dose-response.12-007. Dobrzynski
- [7] Dobrzyński, L., K.W. Fornalski & L.E. Feinendegen 2015. Cancer Mortality Among People Living in Areas With Various Levels of Natural Background Radiation, *Dose-Response* 3 (2015) 1-10
- [8] Dobrzyński, L., Fornalski, K.W. & Reszcyńska, J. 2016. Ryzyko zdrowotne związane z niskimi dawkami promieniowania, *Biuletyn PAA Bezpieczeństwo i Ochrona Radiologiczna* 1 (2016) 42
- [9] Dobrzyński, L., Fornalski, K.W., Socol Y. & Reszcyńska, J. 2016a. Modeling of Irradiated Cell Transformation: Dose- and Time-Dependent Effects, *Radiation Research* 186 (2016) 396-406
- [10] Doss, M. 2012. Evidence supporting radiation hormesis in atomic bomb survivor cancer mortality data. *Dose Response*, 10, 584-92. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23304106>
- [11] Doss, M. 2013. Linear No-Threshold Model vs. Radiation Hormesis. *Dose Response*, 11, 480-497. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24298226>
- [12] Doss, M. 2014. Correcting systemic deficiencies in our scientific infrastructure. *Dose Response*, 12, 185201. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24910580>
- [13] Doss, M. 2016. Changing the Paradigm of Cancer Screening, Prevention, and Treatment. *Dose Response*, 14, 1559325816680539. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27928220>
- [14] El-Ghazaly, M.A., Sadik, N.A., Rashed, E.R. & Abd El-Fattah, A.A. 2013. Neuroprotective effect of EGb761(R) and low-dose whole-body gamma-irradiation in a rat model of Parkinson's disease. *Toxicol Ind Health*. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23696346>
- [15] EPA 2004. *United States Environmental Protection Agency Risk Assessment Task Force, Office of the Science, Advisor. An examination of EPA risk assessment principles and practices.*, Washington, DC.
- [16] Feinendegen, L.E., Pollycove, M. & Neumann, R.D. 2013. Hormesis by Low Dose Radiation Effects: Low-Dose Cancer Risk Modeling Must Recognize Up-Regulation of Protection. w: BAUM, R.P. (ed.) *Therapeutic Nuclear Medicine*. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/174_2012_686
- [17] Fornalski, K.W. & Dobrzyński L. 2010. The healthy worker effect and nuclear industry workers, *Dose Response* 8; 125 - 147, 2010 54-60
- [18] Fornalski, K.W., Dobrzyński L. 2011. Pooled Bayesian analysis of twenty eight studies on radon induced lung cancers, *Health Physics*, September 2011, vol. 101, No. 3, 265 - 273
- [19] Fornalski, K.W. & Dobrzyński L. 2012. Problem niskich dawek promieniowania a sprawa radonu, *Ekoatom*, luty-marzec 2012, 54-60.
- [20] Fornalski, K.W. & Dobrzyński L. 2012a. The cancer mortality in high natural radiation areas in Poland, *Dose-Response* (2012)10:541-561,
- [21] Fornalski, K.W. & Dobrzyński L. 2013. The cancer risk among workers of the nuclear centre at Swierk, Poland, *Nukleonika* 2013, 58(4); 537-542
- [22] Frigerio, N.A., Eckerman, K.F. & Stowe, R.S. 1973. *Argonne Radiological Impact Program (ARIP). Part I. Carcinogenic hazard from low-level, low-rate radiation* [Online]. Argonne National Lab., Ill. <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/4368021> [ANL/ES--26(PT.1)].
- [23] Howe, G. R. & McLaughlin, J. 1996. Breast cancer mortality between 1950 and 1987 after exposure to fractionated moderate-dose-rate ionizing radiation in the Canadian fluoroscopy cohort study and a comparison with breast cancer mortality in the atomic bomb survivors study. *Radiation Research*, 145, 694-707. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8643829>
- [24] Hwang, S.L., Guo, H.R., Hsieh, W.A., Hwang, J.S., Lee, S.D., Tang, J.L., Chen, C.C., Chang, T.C., Wang, J.D. & Chang, W.P. 2006. Cancer risks in a population with prolonged low dose-rate gamma-radiation exposure in radiocontaminated buildings, 1983-2002. *International Journal Radiation Biology*, 82, 849-58. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17178625>
- [25] Ichiseki, H. 2013. Features of disaster-related deaths after the Great East Japan Earthquake. *Lancet*, 381, 204. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23332962>
- [26] Janiak M.K., Wincenciak M., Cheda A., Nowosielska E.M. & Calabrese E.J. 2017. Cancer immunotherapy: how low-level ionizing radiation can play a key role. *Cancer Immunol Immunother* 66 (2017), 819-832. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28361232>
- [27] Jaworowski Z. 1999. Radiation risk and ethics *Physics Today*, September 1999, 24-29
- [28] Koana, T. & Tsujimura, H. 2010. A U-shaped dose-response relationship between x radiation and sex-linked recessive lethal mutation in male germ cells of *Drosophila*. *Radiation Research* 174, 46-51. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20681798>
- [29] Kostyuchenko, V.A. & Krestinina, L. 1994. Long-term irradiation effects in the population evacuated from the east-Urals radioactive trace area. *Science of the Total Environment*, 142, 119-25. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8178130>

- [30] Luckey, T. D. 1980. *Hormesis with ionizing radiation*, Boca Raton, Fla., CRC Press.
- [31] Miller, A. B., Howe, G. R., Sherman, G. J., Lindsay, J. P., Yaffe, M. J., Dinner, P. J., Risch, H. A. & Preston, D. L. 1989. Mortality from breast cancer after irradiation during fluoroscopic examinations in patients being treated for tuberculosis. *N. Engl. J. Med.*, 321, 1285-9. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2797101>
- [32] Murphy, S. L., Kochanek, K. D. & Xu, J. 2015. Deaths: final data for 2012. *Natl Vital Stat Rep*, 63, 1116. http://www.cdc.gov/nchs/data/nvsr/nvsr63/nvsr63_09.pdf
- [33] Nowosielska, E.M., Wrembel-Wargocka, J., Cheda, A., Lisiak E. & Janiak, M.K. 2006. Enhanced cytotoxic activity of macrophages and suppressed tumor metastases in mice irradiated with low doses of X-rays. *Journal of Radiation Research* 47, (2006) 229-236. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16936416>
- [34] Nowosielska, E.M., Cheda, A., Wrembel-Wargocka, J. & Janiak, M.K. 2010. Immunological mechanism of the low-dose radiation-induced suppression of cancer metastases in a mouse model. *Dose-Response* 8 (2010), 209-226. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20585439>
- [35] Nowosielska, E.M., Cheda, A., Wrembel-Wargocka, J. & Janiak, M.K. 2012. Effect of low doses of low-let radiation on the innate anti-tumor reactions in radioresistant and radiosensitive mice. *Dose-Response* 10 (2012), 500-515. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23304101>
- [36] NRC 2006. *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation : BEIR VII Phase 2, National Research Council (U.S.). Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Level of Ionizing Radiation.*, Washington, D.C., National Academies Press.
- [37] Ozasa, K., Shimizu, Y., Suyama, A., Kasagi, F., Soda, M., Grant, E. J., Sakata, R., Sugiyama, H. & Kodama, K. 2012. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiation Research*, 177, 229-43. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22171960>
- [38] Pollycove, M. 2007. Radiobiological basis of low-dose irradiation in prevention and therapy of cancer. *Dose Response*, 5, 26-38. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18648556>
- [39] Reszczyńska, J. & Dobrzyński, L. 2017. Problemy zasad ochrony radiologicznej w obszarze małych dawek promieniowania, *Biuletyn PAA Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna* 1 (2017) 32-40
- [40] Rowland, R. E., Stehney, A. F. & Lucas, H. F. 1983. Dose-response relationships for radium-induced bone sarcomas. *Health Phys*, 44 Suppl 1, 15-31. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6862895>
- [41] Sakamoto, K. 2004. Radiobiological basis for cancer therapy by total or half-body irradiation. *Nonlinearity Biol Toxicol Med*, 2, 293-316. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2657505/>
- [42] Sponsler, R. & Cameron, J. R. 2005. Nuclear shipyard worker study 1980 1988: a large cohort exposed to low-dose-rate gamma radiation. *International Journal of Low Radiation*, 1, 463-478. <http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=7915>
- [43] Strupczewski A. 2010. Czy zaszkozi nam promieniowanie przy normalnej pracy elektrowni jądrowych, rozdz. 2 w książce: Nie bójmy się energetyki jądrowej, COSiW, Warszawa 2010
- [44] Strupczewski A. 2015. Czas już zaktualizować normy ochrony przed promieniowaniem zgodnie ze stanem wiedzy w XXI wieku Ekoatom[0] No 16 (2015) 52-70 [www: http://www.seren.org.pl/wp-content/uploads/2016/01/E16.pdf](http://www.seren.org.pl/wp-content/uploads/2016/01/E16.pdf)
- [45] Strupczewski A. 2016. Normy ochrony przed promieniowaniem. Konieczna aktualizacja, http://energetyka.wnp.pl/normy-ochrony-przed-promieniowaniem-konieczna-aktualizacja,276799_1_0_0.html
- [46] Travis, L. B., Weeks, J., Curtis, R. E., Chaffey, J. T., Stovall, M., Banks, P. M. & Boice, J. D., Jr. 1996. Leukemia following low-dose total body irradiation and chemotherapy for non-Hodgkin's lymphoma. *J Clin Oncol*, 14, 565-71. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8636772>
- [47] UNSCEAR 1994, SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 1994 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes http://www.unscear.org/docs/publications/1994/UNSCEAR_1994_Report.pdf
- [48] Waligórski, M.P.R. 2003. DARI to go where radiation has gone before. *Physics Today, February 2003*, 13-14
- [49] Waligórski, M.P.R., Grzanka, L. & Korcyl, M. 2015. The principles of Katz's cellular track structure radiobiological model, *Radiation Protection Dosimetry* 166 (2015).1-4. doi :10.1093/rpd/ncr201
- [50] Wei, L. C., Ding, Y. X., Liu, Y. H., Duan, L., Bai, Y., Shi, M. & Chen, L. W. 2012. Low-dose radiation stimulates Wnt/beta-catenin signaling, neural stem cell proliferation and neurogenesis of the mouse hippocampus in vitro and in vivo. *Current Alzheimer Research*, 9, 278-89. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22272614>
- [51] Yang, G., Kong, Q., Wang, G., Jin, H., Zhou, L., Yu, D., Niu, C., Han, W., Li, W. & Cui, J. 2014. Low-dose ionizing radiation induces direct activation of natural killer cells and provides a novel approach for adoptive cellular immunotherapy. *Cancer biotherapy & radiopharmaceuticals*, 29, 428-34. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25402754>
- [52] Zablotska, L. B., Ashmore, J. P. & Howe, G. R. 2004. Analysis of mortality among Canadian nuclear power industry workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation. *Radiat Res*, 161, 633-41. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15161357>