

# GENEZA I KONSEKWENCJE STOSOWANIA HIPOTEZY LNT W „OCHRONIE” RADIOLOGICZNEJ

## Genesis and consequences of the application of the LNT hypothesis to radiological „protection”

Marek Krzysztof Janiak

**Streszczenie:** Hipoteza linowej, bezprogowej (linear, no-threshold, LNT) zależności między pochłonięciem niskiej dawki promieniowania jonizującego a ryzykiem rozwoju nowotworu od końca lat 50-tych XX wieku stanowi podstawę regulacji w ochronie radiologicznej, a także utrwała powszechną radiofobię w społeczeństwie. Niniejsza praca dokumentuje, że zarówno geneza, jak i proces „stabilizacji” hipotezy (modelu) LNT, które miały miejsce w latach 1920-1990 w USA, wynikają z ignorowania i manipulacji wynikami badań, osobistych interesów i nieetycznego postępowania wielu uznanych naukowców, gremiów i czasopism naukowych (np. Narodowej Akademii Nauk USA i magazynu *Science*), a także instytucji odpowiedzialnych za tworzenie i wdrażanie przepisów ochrony przed promieniowaniem. Przedstawione są również konsekwencje praktyczne, w tym sytuacje absurdalne wynikające ze stosowania hipotezy LNT w „ochronie” radiologicznej. Wszystko to prowadzi do postulatu, aby jak najszybciej zastąpić nienaukowy model szacowania ryzyka oparty o hipotezę LNT przez mające oparcie w wynikach badań modele progowej i/lub hormetyczny.

**Abstract:** The hypothesis of the linear, no-threshold (LNT) relation between absorption of low doses of ionizing radiation and the risk of radiogenic cancer has since the late 1950s guided the rules of radiological protection and sustained radiophobia in the society. The present review documents that the birth and development of the LNT hypothesis have been associated with oversights, manipulations, and unethical conduct of a number of renowned scientists and scientific institutions and magazines which prompted regulations issued by agencies involved in or responsible for radiological protection. Also, described are the dire consequences and absurdities associated with the practical application of the LNT hypothesis to “protect” against any exposure to ionizing radiation. All this should urge us to immediately abandon the unreasonable LNT-based methodology of estimation of radiological health risks and replace it with the scientifically sound threshold or hormetic models.

**Słowa kluczowe:** hipoteza LNT, historia powstania, przyczyny trwałości, skutki stosowania

**Keywords:** the LNT hypothesis, history of adoption, reasons for its perseverance, consequences of its use

### Wprowadzenie

Gdy po wybuchu reaktora w elektrowni jądrowej (EJ) Fukushima Daiichi (11 marca 2011 r.) ponad 160 tys. mieszkańców opuściło okolicę EJ, aby uniknąć pochłonięcia w ciągu roku ok. 10 mSv<sup>1</sup> promieniowania jonizującego (p.j.), ok. 1600 osób zmarło wskutek utraty domu, więzi rodzinnych i opieki medycznej, stresu oraz innych niedogodności wynikających z nagłej ewakuacji, nikt natomiast nie zmarł z powodu napromieniowania [1,2]. Nasuwa się, więc pytanie, czy pochłonięcie 10 mSv, czyli niskiej dawki promieniowania jonizującego mogłoby doprowadzić do zgonu takiej samej lub większej liczby osób? Odpowiedzią mogą być losy mieszkańców miasta St. George w amerykańskim stanie Utah, położonego niedaleko granicy stanu Nevada, gdzie na poligonie położonym ok. 100 km na północny zachód od Las Vegas prowadzono próbną eksplozję jądrową, a 19 maja

1953 r. zdetonowano bombę „Harry” o mocy 32 kiloton (dwukrotnie silniejszą od bomby „Little Boy” zrzuconej na Hiroszimę). Według szacunków, chmura radioaktywna jaka dotarła nad St. George mogła doprowadzić do pochłonięcia przez mieszkańców rocznej dawki promieniowania jonizującego od 25 do 30 mSv. Pomimo tego, nikt z mieszkańców nie został ewakuowany, a jedynym zaleceniem władz było pozostanie w domach. Obserwacje prowadzone przez wiele następnych lat wykazały, że śmiertelność z powodu nowotworów na południu stanu Utah (gdzie leży St. George) była znacznie mniejsza niż w innych częściach tego stanu (nawet po uwzględnieniu niskiej umieralności u Mormonów) i do dziś statystyki zgonów z powodu raka w Utah należą do najniższych w USA [3,4].

Co więc sprawiło, że – w przypadku Fukushimy – reakcja na „zagrożenie” radiacyjne była tak różna? Przyczyną było oparcie (od połowy lat 1950-tych) regulacji w ochronie radiologicznej (OR) na pozbawionej podstaw naukowych hipotezy, że każda, nawet najmniejsza, dawka promieniowania może być szkodliwa, czyli

<sup>1</sup> Według obowiązujących przepisów ochrony radiologicznej, dopuszczalny limit dawki rocznej dla ogółu ludności wynosi 1 mSv.

tw. liniowej, bezprogowej (ang. *linear no-threshold, LNT*) zależności między dawką pochłoniętego promieniowania jonizującego a (negatywnymi, przede wszystkim – nowotworami) skutkami zdrowotnymi tego pochłonięcia [5]. Przyjęcie hipotezy (modelu) LNT jako podstawy przepisów OR nie tylko nie złagodziło obaw przed promieniowaniem jonizującym (wywołanych głównie atakami jądrowymi na Hiroszimę i Nagasaki), ale przeciwnie – wyolbrzymiło i utrwaliło irracjonalny strach przed jego skutkami, określane jako radiofobia. W roku 1953 (8 lat po detonacji bomb atomowych w Japonii) mieszkańcy St. George nie „chorowali” jeszcze na radiofobię i nie „panikowali” przed promieniowaniem, bo obowiązująca wówczas w OR regulacja określała próg dawki (zob. niżej), poniżej którego pochłanianie promieniowania jonizującego było uważane za niegroźne dla zdrowia. Warto podkreślić, że detonacja bomby „Harry” była tylko jednym z ok. 100 nadziemnych testów jądrowych, jakie w latach 1950 prowadzono na poligonie w Nevadzie, skąd typowe dla tego regionu zachodnie wiatry niosły radioaktywne chmury nad południowy Utah.

### Geneza hipotezy (modelu) LNT

Przez wiele lat, jakie upłynęły od prawie równoczesnych odkryć promieni X (przez Konrada Roentgena w końcu roku 1895) i promieniowania naturalnego (przez Henryka Becquerela na początku roku 1896) źródła i substancje promieniotwórcze były powszechnie i bez większych obaw stosowane w badaniach naukowych, diagnostyce i terapii medycznej, w przemyśle, a także w życiu codziennym (np. substancje promieniotwórcze dodawano do kosmetyków, pasty do zębów, a nawet wody pitnej, aparaty rtg stosowano przy dopasowywaniu butów w sklepie itd.). Działo się tak pomimo świadomości, że częste ekspozycje na „radiację” mogą wywoływać rany i owrzodzenia skóry, zaniki tkanek oraz nowotwory. Uważano jednak, że takie skutki uboczne powstają po przekroczeniu odpowiednio wysokiej (progowej) dawki promieniowania. Rzeczywiście, jak stwierdził w roku 1980 Lauriston S. Taylor, wieloletni przewodniczący amerykańskiego Narodowego Komitetu Ochrony Radiologicznej (NCRP), „nikt nie doznał urazu popromiennego, jeśli nie przekroczone [dawki określonej przez] pierwszy numeryczny standard ustanowiony przez NCRP, a potem także Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP) w roku 1934”. Ten „pierwszy standard” oparty był na wielkości „tolerancyjnej” mocy dawki zaproponowanej przez Arthura Mutschellera, która wynosiła 0,2 rentgena (R), tj. ok. 2 mSv/dzień, czyli ponad 700 mSv/rok<sup>2</sup>. Pomimo tego „nieszkodliwego” pierwszego standardu,

<sup>2</sup> We wrześniu 1924 r. na Zjeździe Amerykańskiego Towarzystwa Rentgenowskiego (American Roentgen Ray Society), Arthur Mutscheller zarekomendował zastosowanie w ekspozycji zawodowej bezpiecznie „tolerowanej” mocy dawki = 680 mSv/rok [6].

od roku 1955 zaczął obowiązywać nowy limit dopuszczalnej (zawodowej) ekspozycji na promieniowanie jonizujące, który wynosił 50 mSv/rok. Tak drastyczne obniżenie dopuszczalnej dawki rocznej było niewątpliwie efektem opublikowanego w roku 1954 przez NCRP raportu stwierdzającego, że „jak wykazały badania” pochłonięcie niskich dawek promieniowania jonizującego wywołuje zaburzenia genetyczne, których nasilenie wzrasta liniowo ze wzrostem pochłoniętej dawki promieniowania [7].

Aby zrozumieć jak doszło do tej zmiany, należy cofnąć się do lat 1920-tych, kiedy to nieco ponad trzydziestoletni genetyk amerykański Hermann Joseph Muller wykazał, że ekspozycje muszek owocowych (*Drosophila melanogaster*)<sup>3</sup> na promieniowanie X prowadzą do zmian niektórych cech zewnętrznych (fenotypu) tych owadów, które były dziedziczone przez potomstwo, czyli powstały w wyniku mutacji, wówczas nazywanych transmutacjami (w owym czasie, nie było metod, aby uwidocznić mutację, a dziś wiemy, że stosowane przez Mullera dawki promieniowania wynoszące powyżej 10 Gy prowadziły do masywnych ubytków i innych zaburzeń w chromosomach, a nie mutacji punktowych, jak sądził Muller). Wyniki tych badań opublikowane zostały w roku 1927 w prestiżowym czasopiśmie *Science* [8]. Jak wykazały dociekania prof. Edwarda Calabrese<sup>4</sup> i współpracowników [9-11] *Science* opublikowało opis tylko dwóch eksperymentów Mullera, bez podania zastosowanych materiałów i metod badawczych ani wykorzystanej literatury przedmiotu. Wiele wskazuje na to, że w „wyścigu”, jaki wówczas toczył się o pierwszeństwo odkrycia, że promieniowanie wywołuje mutacje, a więc – jako powszechne na Ziemi – może być jednym z ważniejszych mechanizmów ewolucji organizmów żywych, ambitny Muller chciał być zwycięzcą za wszelką cenę<sup>5</sup>. „Skłonił” więc ówczesnego redaktora naczelnego (i jednocześnie właściciela) *Science*, Jamesa McKeana Cattella, aby opublikował tę niekompletną pracę, która najpewniej nie była oceniona lub została pobłażliwie potraktowana przez recenzentów [11].

W roku 1930 Muller przekonany, że uszkodzenia (mutacje) genetyczne kumulują się proporcjonalnie do pochłoniętej dawki promieniowania zaproponował termin „proporcjonalność reakcji na dawkę” (*proportionality dose response*) [13], znany także jako „zasada

<sup>3</sup> Muszki *D. melanogaster* stanowią dogodny obiekt badawczy dla genetyków, ponieważ mają krótki cykl życiowy, w genomie tylko 4 pary chromosomów i wydają b. liczne potomstwo.

<sup>4</sup> Edward J. Calabrese jest profesorem toksykologii na Wydziale Środowiskowych Nauk o Zdrowiu Uniwersytetu stanu Massachusetts w Amherst, MA, USA. Jest autorem obszernej literatury naukowej dokumentującej okoliczności i mechanizmy powstania i rozwoju modelu LNT, jako podstawy regulacji w ochronie radiologicznej.

<sup>5</sup> Zainspirowani odkryciami Mullera w roku 1928 Alex Olson i Gilbert Lewis opublikowali w *Nature* pracę potwierdzającą, że mutacje w genomie wywoływane przez promieniowanie pochodzące z kosmosu oraz ze skał i gleby na Ziemi może rzeczywiście być mechanizmem napędowym ewolucji [12].

proporcjonalności” (*proportionality rule*), później przemianowanej na (hipotetyczną) relację typu LNT. Zgodnie z tym poglądem, skumulowane uszkodzenia genetyczne są nieodwracalne (czyli nie podlegają naprawie), a ich nasilenie rośnie liniowo wraz ze wzrostem całkowitej pochłoniętej dawki promieniowania, poczynając od dawki zerowej, czyli praktycznie od poziomu poniżej promieniowania tła (*background radiation*). Tezę tę miały potwierdzić (choć powinny zweryfikować), wyniki badań prowadzonych przez doktoranta Mullera na uniwersytecie w Edynburgu, który zastosował szeroki zakres dawek i mocy dawek [14]. Pomimo istotnych wad tych badań (w zakresie planowania i wykonania doświadczeń, doboru materiału badawczego oraz jakości wyników) Muller posłużył się uzyskanymi danymi, aby przekonywać innych badaczy do poprawności hipotezy LNT i dyskredytacji obowiązującego modelu progowego; później powołał się na nie także w swoim wykładzie noblowskim [15]. Co ciekawe, w roku 1930 inny amerykański genetyk, Lewis J. Stadler, wykazał, że ekspozycja nasion jęczmienia na promieniowanie X w trzech najniższych spośród 13 zastosowanych dawek nie zwiększa liczby naturalnie występujących mutacji w tej roślinie [16]. Ta niezgodna z tezą Mullera obserwacja świadcząca o istnieniu progu dawki, poniżej której promieniowanie nie działa mutagennie, została jednak zignorowana przez ówczesnych genetyków.

W roku 1946 (a więc tuż po zrzuconiu bomb atomowych na Hiroszimę i Nagasaki), Komitet Noblowski przyznał Hermannowi Mullerowi Nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii i medycyny „za odkrycie, że mutacje mogą być indukowane przez promienie X”. W wygłoszonym 12 grudnia tego roku wykładzie noblowskim pt. *The Production of Mutations* Muller stwierdził, że liczba mutacji (w komórkach rozrodczych muszki owocowej) wzrasta liniowo wraz z dawką promieniowania, nawet w obszarze dawek bliskich zeru, i zasugerował zastąpienie obowiązującego dotąd modelu progowego przez *zasadę proporcjonalności* (czyli, praktycznie, model LNT). Pomimo niewątpliwej znajomości wyników badań wskazujących na istnienie progów dawek, poniżej których mutacje nie są indukowane [16], w tym danych uzyskanych przez jego własnych współpracowników w ramach projektu Manhattan i opublikowanych w styczniu 1948 r. [17], Muller kategorycznie stwierdził, że „nie może już być wątpliwości, że mutacje w komórkach zarodkowych indukowane są przez promieniowanie jonizujące w sposób liniowy” [18]<sup>6</sup>. Wszystko wskazuje na to, że Muller – znany ze swojej bezkompromisowej natury – był już wtedy o władnięty „misją” ochrony ludzkości przed zgubnymi skutkami promieniowania, która w kolejnych latach nabrała cha-

rakteru „krucjaty” realizowanej na płaszczyźnie naukowej, administracyjnej, społecznej i politycznej [21].

Sława laureata Nagrody Nobla i wybiórcze cytowanie przez Mullera publikowanych wyników badań spowodowała, że Komitet NCRP w swoim raporcie z roku 1954, poza wyżej wymienionym stwierdzeniem, że niskie dawki promieniowania (nie precyzując jakie) mogą prowadzić do zmian genetycznych, zakładała („*may be taken for granted*”), iż takie same skutki mogą występować u ludzi [7].

Wkrótce, sprawą zajął się Panel Genetyczny Komitetu Akademii Nauk Stanów Zjednoczonych o nazwie BEAR (*Biological Effects of Atomic Radiation*), który składał się z 16 starannie dobranych członków – w większości zwolenników modelu LNT – z Mullerem na czele. W lipcu 1956 r. ukazał się „publiczny raport” tego Panelu [22]<sup>7</sup> (i niebawem jego obszernie streszczenie w *Science*), w którym – na podstawie badań prowadzonych na muszkach owocowych – stwierdzono, że „nie ma ilości (tj. dawki) promieniowania innej niż zerowa, która jest bezpieczna genetycznie” (*there is no amount of radiation which is genetically harmless other than zero*) oraz że „w zasadzie, wszystkie geny zmutowane przez promieniowanie są szkodliwe” (*the mutant genes induced by radiation are generally harmful*) [25]. Niebawem, pojawił się też „dowód” istnienia liniowej, bezprogowej zależności typu LNT także w odniesieniu do skutków somatycznych w postaci nowotworów u ludzi.

W roku 1957 Edward Butts Lewis opublikował w *Science* wyniki badań dotyczących występowania popromiennej białaczki u osób poddanych działaniu promieniowania jonizującego [26]. Praca ta – mimo zastrzeżeń co do kompetencji autora i niejednoznaczności wyników<sup>8</sup> – przyjęta została jako wsparcie rekomendacji Komitetu BEAR i miała przekonać środowisko naukowe i administratorów zdrowia publicznego w USA do przyjęcia „zasady ostrożności” i akceptacji hipotezy LNT. W efekcie, w grudniu 1958 r. NCRP – przyjmując tę rekomendację – objął nią także komórki somatyczne ssaków, co w praktyce oznaczało aplikację modelu LNT

<sup>7</sup> Jak wykazała przeprowadzona wiele lat później kwerenda raport ten nie był zatwierdzony i potem był krytykowany prywatnie przez wielu członków Panelu Genetycznego, jako zawierający błędy merytoryczne i wypaczający poglądy tych członków [23]. Co więcej, już w czasie pierwszego posiedzenia Panelu w roku 1956 dr James V. Neel przedstawił swój raport z 10-letnich badań prowadzonych w kohorcie ofiar ataków atomowych na Hiroszimę i Nagasaki, które nie wykazały u ich potomstwa żadnych zaburzeń, mimo iż dawki pochłonięte przez rodziców sięgały nawet 1,5 Gy [24]. Dane te, wyraźnie niezgodne z ustaleniami i wnioskami Panelu, zostały zignorowane przez jego członków, pomimo faktu, że pochodziły z badań prowadzonych u ludzi [10].

<sup>8</sup> E.B. Lewis był genetykiem, ale opublikował analizy zachorowań na białaczkę, przede wszystkim wśród mieszkańców Hiroszimy i Nagasaki, którzy przeżyli ataki atomowe, choć nie miał do tego odpowiednich kwalifikacji i wykszolenia – ani w zakresie epidemiologii, biologii nowotworów, chemii i dozymetrii radiacyjnej, ani metod szacowania ryzyka zachorowań [27].

<sup>6</sup> Dzisiaj wiemy, że ekspozycje w niskich dawkach promieniowania X lub gamma nie tylko nie zwiększają, ale mogą zmniejszać częstość mutacji poniżej poziomu naturalnie obserwowanego w komórkach rozrodczych muszki owocowej [19,20].

do szacowania ryzyka zachorowań na nowotwory promienne u ludzi<sup>9</sup>.

Warto zaznaczyć, że także w grudniu 1958 r. William L. Russell i wsp. opublikowali w *Science* wyniki swoich badań wskazujących, że: a) 6-8-minutowe napromienianie spermatogonii (aktywnych mitotycznie męskich komórek prąciowych) indukowało prawie 5 razy więcej mutacji niż napromienianie w podobnej dawce trwające przez prawie 6 tygodni (tj. przewlekłe z małą mocą dawki) i b) 10-krotna redukcja mocy dawki „przewlekłej” ponad 3-krotnie zmniejszała częstość mutacji [29]. Autorzy – tłumacząc swoje wyniki – rozważali istnienie *progu* dawki, poniżej którego mutacje nie są indukowane przez promieniowanie, a także możliwość *naprawy* uszkodzeń (mutacji) w genach. Praca ta – choć wtedy jeszcze niedoceniona – miała charakter przełomowy, bo po raz pierwszy bardzo prestiżowe czasopismo wspominało o istnieniu progu dawki i naprawy uszkodzeń genomu, jako zjawisk związanych z działaniem promieniowania.<sup>10</sup> Pomimo tego, że – co podkreślili sami autorzy – wyniki te były całkowicie odmienne (*in sharp contrast*) od obserwacji Mullera u muszek owocowych, Russell i wsp. stwierdzili, że „w ich modelu istnieje zależność liniowa między częstością mutacji a dawką” i że dotyczy ona „nawet najniższych dawek”. Być może – jak sugeruje prof. Calabrese – młodzi genetycy nie chcieli narażać się „wszechwładnemu” wówczas Mullerowi [21]. Pomimo tych sprzecznych z hipotezą LNT danych (które po śmierci Mullera w roku 1967 wyraźnie wyartykułowano), wyżej wymienione stanowisko NCRP zostało przyjęte przez wiele międzynarodowych (w tym, ICRP<sup>11</sup>) i krajowych ciał doradczych i instytucji nadzorczych, stając się podstawą szacowania ryzyka wystąpienia nowotworów zarówno radiogennych, jak i wywołanych przez czynniki chemiczne [23].

W roku 1972 Panel Genetyczny Komitetu BEIR I (*Biological Effects of Ionizing Radiation* – następca komitetu BEAR) Narodowej Akademii Nauk USA, podpierając się m.in. jedną z konkluzji zawartych w publikacji Russella i wsp. z 1958 r. (*the theoretical consequence for chronic irradiation of spermatogonia and oocytes, in this particular model, is a linear relation between mutation rate and dose, even down to the lowest doses*) [29], potwierdził poprawność modelu LNT, opisującego związek między napromieniowaniem a powstawaniem nowotworów

złośliwych [33]<sup>12</sup>. W tej sytuacji, w roku 1976 amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) przyjęła „zależność liniową” jako podstawę dla szacowania ryzyka wystąpienia nowotworów wywołanych przez promieniowanie i substancje chemiczne (oba te czynniki mają działać kancerogennie poprzez indukcję mutacji) [35-37], która – bez większych zmian – stosowana jest do dnia dzisiejszego.

W 2018 r. NCRP – powołując się na wyniki analiz epidemiologicznych z lat 2003-2017 – stwierdziła w swoim Komentarzu nr 27, że model LNT stanowi „najbardziej rozsądną i praktyczną podstawę [regulacji] w ochronie radiologicznej” [38]<sup>13</sup>. I takie stanowisko jest do dziś prezentowane przez rządowe agencje i ciała formułujące i/lub nadzorujące stosowanie przepisów ochrony przed promieniowaniem jonizującym, a także – niestety – wielu pracowników nauki i techniki na całym świecie.

### **Dlaczego hipoteza LNT „odniosła sukces” i ciągle stanowi podstawę „ochrony” przed promieniowaniem?**

Niezależnie od przedstawionych powyżej nadużyć, manipulacji, błędów merytorycznych i metodologicznych oraz nieprzestrzegania standardów naukowych i etycznych przez Mullera i innych badaczy oraz członków organów doradczych i administracyjnych, wyniki wielu opublikowanych przez ponad 20 ostatnich lat analiz epidemiologicznych oraz kontrolowanych badań laboratoryjnych wyraźnie pokazują, że istnieje próg dawek, poniżej którego pochłanianie promieniowania jonizującego (zwłaszcza o niskim LET) nie tylko nie wywołuje nowotworów, ale *obniża* zapadalność i umieralność na te choroby w napromienianych populacjach i/lub hamuje ich rozwój u indywidualnych pacjentów [przegląd literatury w: 41-43]. Jednakże, wielu badaczy nadal broni „poprawności” liniowej i bezprogowej zależności między dawką a skutkiem używając następujących argumentów:

1. nawet najmniejsza dawka (pojedynczy akt jonizacji) pochłoniętego promieniowania potencjalnie

<sup>9</sup> Sprawozdanie z tego raportu NCRP ukazało się na początku 1960 r. w *Science* [28].

<sup>10</sup> W roku 1972 Komitet BEIR I NAS (następca Komitetu BEAR) uznał za wskazane uwzględnienie odkryć Russella i wsp. (opublikowanych w roku 1958 i później) w szacowaniu ryzyka zachorowań na nowotwory [30].

<sup>11</sup> Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) w swojej pierwszej publikacji z 1959 r. ogłosiła, że we wrześniu 1958 r. postanowiła przyjąć model LNT za podstawę: a) szacowania ryzyka odległych skutków popromiennych (głównie nowotworów); b) regulacji w ochronie radiologicznej [31]. Stanowisko to ICRP potwierdziło w swojej publikacji nr 60 z roku 1991 [32].

<sup>12</sup> Ostatni, siódmy raport Komitetu BEIR z roku 2006, poświęcony wyłącznie niskim dawkom promieniowania, także konstatuje, że „aktualne dane naukowe pozostają w zgodzie z hipotezą, że istnieje liniowa, bezprogowa zależność między ekspozycją na promieniowanie jonizujące a rozwojem nowotworów u ludzi” [34].

<sup>13</sup> W oparciu o 3 kryteria (adekwatność badania, dane dozymetryczne i analiza statystyczna wyników) eksperci NCRP ocenili wyniki 29 badań epidemiologicznych opublikowanych w latach 2003-2017, pod względem „siły” (*strength*) z jaką mają one wspierać model LNT. Okazało się, że wyniki tylko 5 badań dały „silne”, a 7 – „średnie” wsparcie tej hipotezie. Co więcej, dokładniejsza analiza 5 „silnie wspierających” badań wykazała błędy interpretacyjne ich wyników, które w rzeczywistości nie wykazały statystycznie istotnej różnicy w częstości zachorowań na popromienne nowotwory złośliwe w populacjach ludzi, którzy pochłonęli nadmiarowo  $\leq 100$  mGy a populacjami nie ekspozowanymi na dodatkowe promieniowanie [39,40].

zaburza strukturę DNA, co może doprowadzić do powstania mutacji i – w efekcie – nowotworowej transformacji komórek;

2. jeśli nawet model LNT zawyża prawdopodobieństwo wystąpienia choroby, to jego celem jest przecież ochrona zdrowia ludzi;
3. model LNT jest prosty i łatwy w interpretacji;
4. nie ma innego, lepszego modelu szacowania ryzyka wystąpienia nowotworów popromiennych [44];
5. model LNT jest akceptowany i propagowany przez wiele prestiżowych gremiów naukowo-doradczych, takich jak NAS, NCRP i ICRP; i wreszcie;
6. istnieją „naukowe dowody” poprawności hipotezy LNT.

Żaden z tych argumentów nie wytrzymuje krytyki. Argument pierwszy nie uwzględnia istnienia sprawnych i wydajnych mechanizmów ochronnych i obronnych przed rozwojem nowotworu, takich jak naprawa DNA, wmiatanie wolnych rodników tlenowych, „samobójcza” śmierć stransformowanych komórek (apoptoza) lub ich terminalne różnicowanie i „starzenie się” (co skutkuje zatrzymaniem podziałów komórkowych), wreszcie – wielostronne działanie układu odpornościowego (tzw. nadzór immunologiczny) [45]. Argument drugi powołuje się na nieracjonalną i nienaukową „zasadę ostrożności” (*precautionary principle*)<sup>14</sup>, która w OR przyjęła postać tzw. reguły ALARA (*as low as reasonably achievable*) [46]. Zbicie argumentu trzeciego jest proste: „prostota” modelu nie świadczy o jego poprawności (często, wprost przeciwnie) i nie powinna być podstawą jego praktycznej przydatności<sup>15</sup>, a argument czwarty jest zwyczajnie nieprawdziwy, o czym świadczą wyniki wielu wspomnianych wyżej badań epidemiologicznych i doświadczalnych, które wyraźnie wskazują na istnienie progowej i/lub hormetycznej zależności między pochłoniętą dawką promieniowania a skutkiem w postaci nowotworu. Argument piąty nie ma charakteru merytorycznego i jest wynikiem wieloletniego „przywiązania” wielu przedstawicieli organów regulacyjnych i nadzorczych, a także licznych badaczy do hipotezy LNT, w którą zbyt długo „inwestowali”, aby teraz z niej zrezygnować i przyznać się do błędu [48].

Ostatni argument wymaga szerszego omówienia. Aby znaleźć naukowe uzasadnienie dla poprawności hipotezy LNT jej zwolennicy posługują się różnymi manipulacjami (*employ misinforming procedures*) [49]. Koronnym przykładem jest „przerzucanie odpowie-

dzialności” na przeciwników LNT, którzy mają naukowo udowodnić bezzasadność tej hipotezy. Na przykład, amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) stoi na stanowisku, że model LNT, nawet jeśli nie ma wystarczającego poparcia naukowego (!), ma obowiązywać dopóty, dopóki nie znajdą się „przekonywujące dowody [pochodzące z badań epidemiologicznych prowadzonych na populacjach ludzkich] świadczące przeciwko” tej hipotezie [37,50]. Eksperti EPA, a także inni naukowcy, dobrze wiedzą, że badania epidemiologiczne – ze względu na swój charakter – nie są w stanie wykazać z odpowiednią mocą statystyczną, że ekspozycje w niskich dawkach *nie* prowadzą do wzrostu zachorowań na nowotwory lub inne choroby<sup>16</sup>.

W dodatku, takie podejście jest niezgodne z podstawową metodologią badań naukowych, która polega na odrzucaniu hipotezy zerowej (*null hypothesis*) zakładającej, że – w naszym przypadku – ekspozycja na promieniowanie w niskich dawkach *nie* zwiększa częstości zachorowań na nowotwory); założenie to można odrzucić tylko wtedy, gdy wykaże się z odpowiednią „mocą” (czyli np. przy  $p < 0,05$ ), że jest inaczej [53]. Mimo to, wyznawcy modelu LNT nagminnie przyjmują go za hipotezę zerową, a potem: a) próbują udowodnić, że jest on prawdziwy (jest to tzw. błędne koło argumentacji, *circular reasoning*) [54] i/lub b) domagają się, aby przeciwnicy LNT wykazali błędność tego modelu, co jest epistemologicznie i metodologicznie nie do wykonania [55]. Do „zabiegów” stosowanych przez autorów analiz epidemiologicznych, które mają wykazywać poprawność hipotezy LNT należą:

- a. ignorowanie lub dezawuowanie danych (pochodzących nawet z własnych badań), które nie są zgodne z tą hipotezą i cytowanie jedynie wyników mających wspierać tę hipotezę (tzw. *cherry picking*),
- b. manipulowanie metodami statystycznymi (np. używanie jednostronnych zamiast dwustronnych testów istotności, stosowanie przedziałów ufności na poziomie 90% zamiast 95%, traktowanie wyników nieznamiennych statystycznie, jako znamienne itp.),
- c. stosowanie błędnych lub niepełnych danych dozymetrycznych (w tym, nieuwzględnianie dawek rzeczywiste pochłoniętych, np. w czasie badań medycznych lub w ramach tzw. *dose lagging*),
- d. błędne lub tendencyjne interpretowanie wyników (np. powoływanie się na „efekt zdrowego pracow-

<sup>14</sup> WIKIPEDIA: według Davida Deutscha, zasada ostrożności jest „wyrazem głębokiego konserwatyzmu i cały postęp ludzkości jest historią łamania istniejących w różnych kulturach ‘zasad ostrożności’. ... zaś jedyną metodą zdobywania wiedzy jest podejmowanie eksperymentów, a co za tym idzie ryzyka eksperymentów nieudanych. Szkoda płynąca z innowacji jest zawsze skończona, tymczasem korzyści mogą być potencjalnie nieskończone”.

<sup>15</sup> Twierdzenia, które generują uproszczone i „wygodne w użyciu” związki między przyczyną a skutkiem nie powinny stanowić podstawy polityki rządowej [47].

<sup>16</sup> Jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest to, że – ze względu na niewielkie prawdopodobieństwo wywołania nowotworu przez ekspozycje w niskich dawkach promieniowania i wysoką częstość zachorowań na nowotwory „spontaniczne”, niezwiązane z działaniem promieniowania – dla wykazania wymaganej znamienności statystycznej przeciwnowotworowego działania niskich dawek promieniowania – liczba badanych osób (napromieniowanych i „kontrolnych”) musi być bardzo duża: np. przy badaniu wpływu dawki o mocy 50 mGy/rok badana kohorta musi liczyć blisko 1000 osób, a przy mocy dawki = 1 mGy/rok – już ponad 1 800 tys. [51,52].

nika”, pomijanie tzw. „odwróconej przyczynowości” – *reverse causality*),

- e. brak lub zły dobór grupy kontrolnej,
- f. stosowanie pojęcia dawki zbiorowej (*collective dose*) itd.

Wreszcie, przy interpretacji uzyskanych wyników powszechne jest ignorowanie *mechanizmów* biologicznych (*epidemiology without biology*) obserwowanych lub domniemywanych skutków ekspozycji na promieniowanie [49,56,57].

Swój udział w korzyściach z podtrzymywania powszechnego przekonania o szkodliwości promieniowania każdego rodzaju i w każdej dawce ma niewątpliwie silne „lobby” administracyjno-regulacyjne w ochronie radiologicznej, które – dla swego działania – potrzebuje wsparcia ze strony rządów i agencji pozarządowych. Z powszechnej radiofobii korzystają także różne organizacje „ekologiczne”, nawołujące do rezygnacji z produkcji energii w elektrowniach jądrowych na rzecz mniej wydajnych, mniej bezpiecznych i mniej stabilnych źródeł energii, takich jak wiatr, woda i słońce.

Innymi przyczynami „trwałości” modelu LNT są niewątpliwie interesy biznesowe branży paliw kopalnych<sup>17</sup> i odnawialnych źródeł energii, a także producentów dedykowanego sprzętu pomiarowego oraz przedstawicieli przemysłu farmaceutycznego, którzy słusznie obawiają się, że radioterapia przy użyciu niskich dawek promieniowania jonizującego może zostać uznana za skuteczniejszą i tańszą od chemioterapii metodę leczenia nowotworów i innych chorób [41].

### Konsekwencje stosowania modelu LNT w praktyce

Wyżej opisane historyczne uwarunkowania, zwodnicze i nieetyczne metody uzasadniania i wdrażania hipotezy LNT oraz bazujące na niej programy szkolenia i edukacji<sup>18</sup> lekarzy, fizyków i inżynierów jądrowych, regulatorów i inspektorów ochrony ra-

diologicznej, a także redaktorów czasopism, radia i TV doprowadziły do sytuacji, w której model LNT jest traktowany – wprost lub domyślnie – za jedynie słuszną podstawę regulacji w ochronie pracowników i społeczeństwa przed działaniem promieniowania jonizującego. Konsekwencje takiego stanu są wielorakie (medyczne, ekonomiczne, społeczne, technologiczne i inne), przy czym większość z nich ma zdecydowanie negatywny charakter.

Po pierwsze, zamiast chronić życie i zdrowie ludzi „ochrona” oparta na kreującym i wyolbrzymiającym „zagrożenie” radiologiczne modelu LNT doprowadziła już do śmierci, chorób, cierpień i stygmatyzacji setek tysięcy osób przymusowo ewakuowanych ze skażonych (i potencjalnie skażonych) terenów wokół uszkodzonych elektrowni jądrowych w Czarnobylu i Fukushima [2,59,60]. Po drugie, generowana i utrwalana przez hipotezę LNT radiofobia, czyli irracjonalny strach przed promieniowaniem jonizującym (która dotyczy zarówno pacjentów, jak i – niestety – wielu lekarzy), prowadzi często do rezygnacji z wykonywania badań rentgenowskich umożliwiających postawienie właściwej diagnozy medycznej, a więc też ratowanie zdrowia i życia [47,48]. Podobnie, zarówno radiofobia, jak i wynikające bezpośrednio z hipotezy LNT przepisy „ochrony” radiologicznej uniemożliwiają lub znacznie utrudniają prowadzenie prób klinicznych ekspozycji *całego ciała* chorych na nowotwory rozsiane, u których taka terapia – pozbawiona skutków ubocznych chemioterapii i radioterapii klasycznej – może być jedyną skuteczną metodą leczenia [41]. Z ekonomicznego punktu widzenia, oparte na LNT przepisy ochrony radiologicznej znacznie zawyżają koszty i komplikują proces opracowywania i egzekwowania tej „ochrony”, a także wymagają utrzymywania „armii” inspektorów oraz edycji wielostronicowych dokumentów. Powszechna w społeczeństwie radiofobia stanowi także poważną przeszkodę we wdrażaniu programów energetyki jądrowej i/lub prowadzi do likwidacji istniejących elektrowni atomowych (np. w Niemczech, po katastrofie w Fukushima). Radiofobia jest także niewątpliwą „przyjaciółką” terrorystów, którzy detonując lub grożąc odpaleniem tzw. brudnej bomby, z łatwością osiągną swój główny cel – panikę, chaos, zamieszki i destabilizację gospodarczą i polityczną ogarniającą duże grupy ludzi i znaczne połacie miasta lub kraju, podczas gdy rannych, a tym bardziej śmiertelnych, ofiar takiej „bomby” będzie bardzo niewiele [61].

Nic więc dziwnego, że wielu uznanych naukowców z różnych dziedzin (fizycy, lekarze, biolodzy), dobrze obeznanych z działaniem niskich dawek promieniowania jonizującego na organizmy żywe, niejednokrotnie protestowało przeciwko traktowaniu hipotezy LNT jako „odkrycia naukowego” stanowiącego podstawę dla tworzenia przepisów ochrony radiologicznej (Tabela 2).

<sup>17</sup> W tym kontekście warto podkreślić, że – jak pisze prof. Calabrese – powołany w roku 1955 Panel genetyczny Komitetu BEAR NAS (który w czerwcu 1956 r. stwierdził, że każda dawka promieniowania jonizującego może wywołać mutację, a każda mutacja jest potencjalnie szkodliwa, czyli – w domyśle – może doprowadzić do rozwoju nowotworu) składał się w dużej mierze z genetyków, którzy prowadzili badania i zostali „wybrani” na członków tego Panelu dzięki wsparciu Fundacji Rockefellera – założonej i kierowanej przez rodzinę największych magnatów naftowych [9].

<sup>18</sup> Na przykład jeden z głównych światowych podręczników radiobiologii, *Radiobiology for the Radiologist* Erica Halla [58] nie informuje, że: a) liczba uszkodzających DNA rodników tlenowych, które powstają podczas normalnego metabolizmu komórkowego jest wielokrotnie większa niż po pochłonięciu niskiej dawki promieniowania jonizującego b) komórki dysponują wieloma mechanizmami naprawy uszkodzeń wywołanych przez promieniowanie jonizujące c) niskie dawki promieniowania jonizującego pobudzają te mechanizmy, w tym układ odpornościowy, co przynosi korzyści zdrowotne; d) istnieją progi dawek, poniżej których nie występują niekorzystne skutki zdrowotne działania promieniowania jonizującego.

**Tabela 1.** Przykłady absurdów wynikających ze stosowania przepisów i akcji „ochronnych” będących następstwem hipotezy LNT  
**Table 1.** Examples of absurdities resulting from the application of regulations and “protective” actions based on the LNT hypothesis

Sytuacja/postępowanie	Istota niedorzeczności/nielogiczności
Rakotwórcze działanie bardzo niskiej dawki pochłoniętej przez dużą liczbę osób jest takie samo jak pochłonięcie wysokiej dawki przez kilka osób.	To, niezgodne z rzeczywistością, założenie wynika z koncepcji <i>dawki kolektywnej</i> [62], która jest konsekwencją hipotezy LNT.
Zgodnie z wymogami stawianymi przez dozór jądrowy dawki promieniowania emitowanego przez elektrownię jądrową nie powinny przekraczać 0,3 mSv/rok, czyli być znacznie mniejsze od dawek dopuszczalnych dla ogółu ludności (1 mSv/rok) [63].	Gdyby mieszkaniec Wrocławia przeprowadził się do Krakowa, jego dawka roczna od naturalnego promieniowania gamma wzrosłaby o 0,36 mSv. Gdyby zaś w pobliżu jego mieszkania wybudowano nowoczesną elektrownię jądrową, to dawka promieniowania na płocie tej elektrowni wynosiłaby tylko ok. 0,01 mSv/rok – ponad 30 razy mniej, niż po przeprowadzce do Krakowa [63].
Przymusowa ewakuacja wielu tysięcy osób z terenów skażonych po „Czarnobylu” (gdzie moc dawki była mniejsza od mocy dawki na plaży w Guarapari w Brazylii) i „Fukushimie” (moc dawki <10 mSv/rok – niezagrażająca zdrowiu i życiu).	Wysiedlenie mieszkańców z terenów, gdzie moc dawki promieniowania jest wyraźnie niższa od poziomu naturalnego w wielu miejscach na Ziemi, było przyczyną zgonów, chorób, zaburzeń psychicznych, nałogów i stygmatyzacji tysięcy przesiedleńców.
Unikanie lub rezygnacja z badań diagnostycznych przy użyciu promieniowania jonizującego, w tym TK i mammografii.	Takie badania często ratują zdrowie i życie, natomiast ich potencjalnie szkodliwe (rakotwórcze) działanie praktycznie nie istnieje.
Aborcje u kobiet w ciąży poddawanych badaniom rtg lub będących ofiarami awarii radiacyjnych.	Ryzyko śmierci z powodu nowotworów lub innych chorób u ponad 75 300 dzieci urodzonych od 1946 do 1984 r. przez mieszkanki Hiroshimy i Nagasaki, które przeżyły ataki jądrowe nie ma związku z dawką promieniowania jonizującego pochłoniętego przez gonady matek lub ojców [64].
Zlecenie kosztownych zabiegów dla maksymalnego obniżenia stężenia radonu (wyrażanego w Bq/m <sup>3</sup> ) w powietrzu w domach mieszkalnych.	W zakresie do ok. 250 Bq/m <sup>3</sup> istnieje <i>odwrotna</i> zależność między stężeniem radonu a szansą zachorowania na raka płuc (czyli zbyt duże obniżenie stężenia radonu może zwiększyć ryzyko zachorowania) [65].
Powstrzymanie budowy i/lub zamykanie elektrowni jądrowych.	Elektrownie jądrowe są najbardziej wydajnym, najstabilniejszym i najmniej emisyjnym źródłem energii, które w warunkach rosnącego zapotrzebowania na prąd nie mogą być zastąpione przez inne źródła [66].
Zaniechanie prób leczenia nowotworów za pomocą napromieniania całego ciała w niskich dawkach promieniowania jonizującego.	Niemożliwość wystandaryzowania tej metody leczenia uogólnionych nowotworów (chłoniaków, białaczek, mnogich przerzutów nowotworowych), która jest tak samo lub bardziej skuteczna niż chemioterapia, ale nie ma żadnych skutków ubocznych chemioterapii [41].
Zaniechanie prób leczenia infekcji układu oddechowego, w tym chorych na COVID-19, za pomocą napromieniania klatki piersiowej.	Brak wystandaryzowania tej formy terapii mimo dowodów*, że stan zdrowia chorych na COVID-19 ulegał szybkiej poprawie po napromienianiu kl. piersiowej prom. X/γ w dawkach 0,5-1,5 Gy *wyniki 9 prób klinicznych przeprowadzonych u 132 chorych w USA, Iranie, Indiach, Hiszpanii, Polsce i Szwajcarii [publikacja w przygotowaniu].
Wypalone paliwo z EJ musi być trwale oddzielane od otoczenia człowieka poprzez składowanie głęboko pod ziemią/na dnie mórz.	Wypalone paliwo z EJ z czasem traci swoją radioaktywność, a odpady z elektrowni węglowych (popiół, żużel), które są stale toksyczne są składowane na hałdach na powierzchni Ziemi [63]
W 2020 r. na zlecenie Komisji Normalizacyjnej Energii Jądrowej USA ( <i>Nuclear Regulatory Commission</i> ) wydano 15 tys. dolarów na odnalezienie 150 mg plutonu Pu-238 pochodzącego z rozrusznika sercowego, który zaginął po likwidacji szpitala uniwersyteckiego w Filadelfii.	Rozruszniki zasilane plutonem Pu-238 były stosowane w USA od 1970 r. do połowy lat 1980-tych u ok. 1500 pacjentów bez jakichkolwiek skutków ubocznych pochłanianej przez tych pacjentów dawki promieniowania (ok. 5 mSv/rok) [67].

**Tabela 2.** Opinie krytyczne nt. hipotezy LNT wyrażane przez kompetentnych naukowców  
**Table 2.** Critical opinions on the LNT hypothesis expressed by competent scientists

Naukowiec	Opinia	Rok ogłoszenia
<b>Lauriston S. Taylor</b> fizyk amerykański, założyciel i wieloletni przewodniczący komitetu NCRP	[obliczanie liczby zgonów z powodu rutynowych badań rtg w oparciu o zależność LNT traktowaną jako fakt, a nie jak teorię] jest „głęboko niemoralnym korzystaniem z naszego naukowego dziedzictwa” ( <i>deeply immoral uses of our scientific heritage</i> )	1980 <sup>1</sup>
<b>Zbigniew Jaworowski</b> polski lekarz i radiobiolog, wieloletni przedstawiciel Polski w Komitecie UNSCEAR	„Regulacje prawne oparte na dogmacie mówiącym, że każde promieniowanie jest szkodliwe, jest największą mistyfikacją XX wieku” ( <i>Laws based upon the dogma that all radiation is harmful is the greatest hoax of the twentieth century</i> )	1994 <sup>2</sup>
<b>Gunnar Walinder</b> szwedzki radiobiolog, były przewodniczący Szwedzkiego Towarzystwa Radiobiologicznego	„Korzystanie przez społeczność ochrony radiologicznej z hipotezy LNT jest jednym z największych skandali naszych czasów” ( <i>As practiced by the modern radiation protection community the LNT hypothesis is one of the greatest scientific scandals of our time</i> )	1995 <sup>3</sup>
<b>Margaret N. Maxley</b> profesor inżynierii biomedycznej, Uniwersytet Teksasu w Austin	„Hipoteza LNT... okazała się nieuzasadniona naukowo oraz niewybaczalna etycznie” ( <i>the LNT hypothesis... has in its maturity become scientifically illegitimate and ethically indefensible</i> )	1997 <sup>4</sup>
<b>Bill Sacks, Gregory Meyerson, Jeffrey A. Siegel</b> naukowcy amerykańscy	„[LNT] jest gigantycznym naukowym błędem, który przyjęty został za podstawę polityki [w ochronie radiologicznej] i który ciągle udaje odkrycie naukowe” ( <i>a gigantic scientific oversight that was taken over as a policy choice and now masquerades as a scientific discovery</i> )	2016 <sup>5</sup>
<b>Jeffrey A. Siegel, Charles W. Pennington, James S. Welsh</b> naukowcy i lekarze amerykańscy	Model LNT... stanowi jedno z największych błędnych przekonań i niedopatrzeń jakich dopuściła się społeczność naukowców ( <i>LNT model represents one of the greatest misapprehensions and oversight failures within the scientific research community</i> )	2018 <sup>6</sup>

<sup>1</sup> The Sievert Lecture pt. Some non-scientific influences on radiation protection standards and practice. V Kongres IRPA (International Radiation Protection Association), 9-14.03.1980 r., Jerozolima, Izrael.

<sup>2</sup> Jaworowski Z. Hormesis: The beneficial effects of radiation. 21st Century 7:22-26, 1994.

<sup>3</sup> Gunnar Walinder w monografii pt. Has Radiation Protection Become a Health Hazard? opublikowanej w Szwecji w 1995 r.

<sup>4</sup> Wykład pt. The LNT Hypothesis: Ethical Travesties, Wingspread Conference, 1-3.08.1997 r., Racine, Wisconsin, USA.

<sup>5</sup> Sacks B, Meyerson G, Siegel JA. w pracy pt. Epidemiology without biology: False paradigms, unfounded assumptions, and specious statistics in radiation science. *Biol Theory* 11:69–101, 2016.

<sup>6</sup> Siegel JA, Pennington CW, Sacks B, Welsh JS. The birth of the illegitimate linear no-threshold model: an invalid paradigm for estimating risk following low-dose radiation exposure. *Am J Clin Oncol*. 41:173–177, 2018. doi: 10.1097/COC.000000000000244.

### Co należałoby zrobić?

Ponieważ nie mający podstaw naukowych i zmanipulowany model LNT „zrodził się” w wyniku deliberacji i zaleceń komitetów BEAR i BEIR powołanych i firmowanych przez Akademię Nauk USA (NAS), przy czynnym wsparciu czasopisma *Science*, wypadałoby, aby zarówno NAS jak i *Science* zweryfikowały swoje stanowisko i przyznały się do manipulacji i/lub błędnej interpretacji danych naukowych, na których oparły swoje zalecenia i publikacje. Jak dotąd jednak, zarówno wyżej wymienione krytyczne uwagi uznanych naukowców, jak i monity kierowane do tych instytucji przez specjalistyczne organizacje zaniepokojone ciągłym traktowaniem hipotezy LNT jako praktycznej podstawy regulacji w OR (np. pismo członków SARI<sup>19</sup> wystosowane do redakcji magazynu

*Science* i do NAS) pozostają bez odpowiedniej reakcji [11]. Co więcej, w konkluzji swego raportu opublikowanego w roku 2006 Komitet BEIR VII – niezgodnie z prawdą – stwierdza, że „...obecna wiedza naukowa pozostaje w zgodzie z hipotezą, że zależność między ekspozycją na promieniowanie jonizujące a rozwojem nowotworów u ludzi ma charakter liniowy i bezprogowy (LNT)” [34]. Notabene, tytuł tego raportu, który poświęcony jest wyłącznie skutkom ekspozycji w niskich dawkach promieniowania jonizującego, mówi jedynie o „ryzyku zdrowotnym” (*health risks*) takich ekspozycji, co wyraźnie wskazuje na (celowe?) pomijanie lub negowanie wielu dobrze poznanych już, *korzystnych* dla zdrowia skutków pochłaniania niskich dawek promieniowania.

<sup>19</sup> SARI (*Scientists for Accurate Radiation Information*, <https://radiationeffects.org>) to powołana w 2013 r. międzynarodowa grupa ekspertów, której działania mają na celu usunięcie bezpodstawnych obaw dot. niskich dawek promieniowania jonizującego przez dostarczanie rzetelnych informacji o skutkach zdrowot-

nych działania takich dawek. Obecnie, grupa ta liczy ponad 100 profesjonalistów (fizyków, radiobiologów, lekarzy, epidemiologów, statystyków, inżynierów, dziennikarzy i redaktorów naukowych oraz innych specjalistów) z 15 różnych krajów. Petycję z prośbą o odwołanie swojego stanowiska w sprawie modelu LNT SARI wysłało m.in. do redaktor naczelnej magazynu *Science* oraz Pani Prezydent NAS.

Na szczęście, liczne nowo pojawiające się, a także ponowne analizy wcześniej opublikowanych wyników badań epidemiologicznych, wspierane potencjalnymi mechanizmami odkrywanymi w kontrolowanych eksperymentach prowadzonych na zwierzętach i komórkach (które dokumentują bezzasadność modelu LNT), już przyniosły owoce. W roku 2005 Akademia Nauk oraz Narodowa Akademia Medycyny Republiki Francuskiej we wspólnym raporcie stwierdziły, że hipoteza LNT „nie jest oparta na współczesnej wiedzy o mechanizmach biologicznych i dlatego nie powinna być nierozważnie (*sans précaution*) stosowana do szacowania ryzyka związanego z działaniem małych, a zwłaszcza bardzo małych (<10 mSv) dawek” [68]. Zmianie ulega też stanowisko niektórych ważnych gremiów regulacyjnych i doradczych, które wcześniej bez zastrzeżeń przyjmowały model szacowania ryzyka oparty na hipotezie LNT: w swoich stosunkowo niedawnych rekomendacjach i raportach zarówno ICRP, jak i UNSCEAR zalecają *niestosowanie* tego modelu do oceny następstw zdrowotnych pochłonięcia promieniowania jonizującego w niskich dawkach, w tym także do planowania i analiz wyników badań epidemiologicznych. [46,69]. W roku 2018 także EPA zmodyfikowała swoje dotychczasowe stanowisko zalecając, aby przestać używać modelu LNT jako podstawy regulacji w ochronie zdrowia, słusznie argumentując, że model ten wzbudza w społeczeństwie niepotrzebne obawy przed stosowaniem promieniowania jonizującego do celów diagnostycznych i terapeutycznych [70].

Ciągle jednak hipoteza LNT i jej praktyczne wykorzystanie znajduje licznych zwolenników. Dlatego konieczne są dalsze działania dla jej dyskredytowania, także poprzez odpowiednią, szeroko zakrojoną edukację. Niezbędne jest odpowiednie uświadamianie społeczeństwu, ale także środowisku akademickiemu, lekarzom, fizykom i inżynierom jądrowym, regulatorom i inspektorom OR, wreszcie administratorom, działaczom i politykom zaangażowanym w ochronę zdrowia, jak powstał i utrwalił się model LNT, który – nie mając oparcia w wynikach rzetelnych badań naukowych – nie powinien być brany pod uwagę w planowaniu i interpretacji prac badawczych dot. biomedycznych skutków działania niskich dawek promieniowania jonizującego, i nie może stanowić podstawy przepisów dotyczących ochrony przed ekspozycjami zawodowymi i środowiskowymi na to promieniowanie. W tym kontekście, istotne znaczenie powinna mieć zmiana terminologii stosowanej w publikacjach naukowych i popularnonaukowych, materiałach edukacyjnych, na wykładach i szkoleniach, a także w odpowiednich aktach prawnych i wytycznych ogłaszanych przez państwo i jego agendy: chodzi tu przede wszystkim o zastąpienie powszechnie używanych terminów „narażenie” na promieniowanie lub „zagrożenie” radiacyjne (co implikuje wyłącznie działanie szkodliwe promieniowania jonizującego),

przez określenia takie jak „ekspozycja” na promieniowanie jonizujące lub „pochłanianie” promieniowania. Taki postulat, zgłoszony przez polską delegację w czasie ostatniej, 71. sesji komitetu UNSCEAR w maju 2024 r., został przyjęty do rozważenia.

Jednocześnie, należy prowadzić i wspierać badania, które mogą dostarczyć kolejnych dowodów naukowych wskazujących nie tylko na brak niekorzystnych skutków zdrowotnych u osób poddawanych działaniu niskich dawek/mocy dawek promieniowania jonizującego ( $\leq 100$  mGy przy ekspozycji jednorazowej lub krótkotrwałej i  $\leq 0,1$  mGy/min przy ekspozycji przewlekłej), ale które udokumentują występowanie reakcji adaptacyjnych i dobroczynnych, takich jak redukcja osobniczej radiowrażliwości, hamowanie rozwoju i osłabianie reakcji zapalnych, zmniejszenie liczby nowotworów spontanicznych czy poprawa komfortu i wydłużenie życia [przegląd badań, m.in., w 43,71,72], a także łagodzenie objawów stanów demencyjnych, takich jak choroba Alzheimera [73]. Istotną rolę w tej edukacji powinny odgrywać towarzystwa naukowe i organizacje pozarządowe, których działalność związana jest z p.j., a zwłaszcza odpowiednie platformy i fora internetowe dostępne dla ogółu odbiorców; przykładem są takie inicjatywy jak grupa SARI (*Scientists for Accurate Radiation Information*) oraz fundacja XLNT<sup>20</sup>, których celem jest rozwiewanie obaw przed ekspozycjami w niskich dawkach promieniowania jonizującego i zachęcanie do zmiany obecnych przepisów OR na bardziej racjonalne i naukowo uzasadnione.

Wszystkie te działania, niezależnie od stale gromadzonych danych naukowych, powinny ostatecznie doprowadzić do zmiany obowiązujących przepisów OR opartych nie na hipotezie LNT lecz na modelu progowym (co byłoby uzasadnionym i symbolicznym powrotem do regulacji obowiązujących w USA do roku 1955) lub hormetycznym (który także zakłada istnienie progu dawek, poniżej którego nie tylko nie występują efekty niekorzystne, ale obserwuje się dobroczynne skutki ekspozycji na promieniowanie). Od końca XX wieku stale postulują to liczni naukowcy i lekarze (w tym polscy badacze – L. Dobrzyński, M.K. Janiak, Z. Jaworowski, A. Strupczewski, M. Waligórski), którzy – często, jako świadkowie kosztownych i zgubnych konsekwencji unikania ekspozycji na promieniowanie w niskich dawkach – opierają swój wniosek na wieloletnich badaniach własnych oraz wynikach innych autorów [11,41-45,48,54,72-93]. Rzeczywiście, najwyższa już pora, aby porzucić fałszywą i szkodliwą hipotezę LNT (która „wiąże nas w czasie przeszłym”) [44] na rzecz modelu progowego.

<sup>20</sup> Fundacja XLNT (*X out LNT*, czyli „wykreśl LNT”) to założona w 2015 r. organizacja pożytku publicznego, której celem jest rozpowszechnianie informacji o korzystnych dla zdrowia skutkach działania niskich dawek promieniowania jonizującego, eliminacji hipotezy LNT ze wszystkich jej praktycznych zastosowań i zachęcanie do zmiany odpowiednich przepisów ochrony radiologicznej.

wego lub hormetycznego opartego na współczesnej wiedzy o biomedycznym działaniu niskich dawek promieniowania jonizującego [94,95].

Marek Krzysztof Janiak

\*Emerytowany profesor nauk medycznych, były kierownik Zakładu Radiobiologii i Ochrony Radiacyjnej Wojskowego Instytutu Higieny i Epidemiologii; członek Rady ds. Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej przy Prezesie Państwowej Agencji Atomistyki; z-ca Reprezentanta Polski w Komitecie Naukowym ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR)

#### Literatura:

- [1] Hasegawa A, Ohira T, Maeda M, Yasumura S, K. Tanigawa K. Emergency responses and health consequences after the Fukushima accident; evacuation and relocation. *Clin. Oncol.* 28:237-244, 2016.
- [2] Sutou S. A message to Fukushima: nothing to fear but fear itself. *Genes Environ* 38:12, 2016. doi: 10.1186/s41021-016-0039-7.
- [3] Machado SG, Land CE, McKay FW. Cancer mortality and radioactive fallout in Southwestern Utah. *Am J Epidemiol*, 125: 44-61, 1987. doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a114511.
- [4] Church BW, Brooks AL. Cost of fear and radiation protection actions: Washington County, Utah and Fukushima, Japan {Comparing case histories}. *Int J Radiat Biol.* 96:520-531, 2020. doi: 10.1080/09553002.2020.1721595.
- [5] Siegel JA, Pennington CW, Sacks B, Welsh JS. The birth of the illegitimate linear no-threshold model: an invalid paradigm for estimating risk following low-dose radiation exposure. *Am J Clin Oncol.* 41:173-177, 2018. doi: 10.1097/COC.0000000000000244.
- [6] Inkret WC, Meinhold CB, Taschner JC. A brief history of radiation protection standards. *Los Alamos Science* 23:116-123, 1995. Available at: <http://www.fas.org/sgp/othersgov/doe/lanl/00326631.pdf>.
- [7] NCRP 1954: National Committee for Radiation Protection. Permissible Dose from External Sources of Ionizing Radiation, Handbook 59, National Bureau of Standards Handbook, 1954, 59, pp. 17-19.
- [8] Muller HJ. Artificial transmutation of the gene. *Science* 66: 84-87, 1927.
- [9] Calabrese EJ. The linear No-Threshold (LNT) dose response model: A comprehensive assessment of its historical and scientific foundations. *Chem Biol Interact.* 301: 6-25, 2019. doi: 10.1016/j.cbi.2018.11.020.
- [10] Calabrese EJ, Selby PB, Giordano J. Ethical challenges of the linear non-threshold (LNT) cancer risk assessment revolution: History, insights, and lessons to be learned. *Sci Total Environ.* 832, 155054, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155054.
- [11] Calabrese EJ. Cancer risk assessment, its wretched history and what it means for public health. *J Occup Environ Hyg.* 21(4): 220-238, 2024. doi: 10.1080/15459624.2024.2311300.
- [12] Olson AR, Lewis GN. Natural reactivity and the origin of species, *Nature* 121(3052): 673-674, 1928.
- [13] Muller HJ. Radiation and genetics. *Am. Nat.* 64, 220-251, 1930.
- [14] Ray-Chaudhuri SP. The validity of the Bunsen-Roscoe law in the production of mutations by radiation of extremely low intensity. *Proc. R. Soc. Edinb.* B 62, 66-72, 1944.
- [15] Calabrese EJ. Ethical failings: The problematic history of cancer risk assessment. *Environ Res.* 193: 110582, 2021a. doi: 10.1016/j.envres.2020.110582.
- [16] Stadler LJ. Some genetic effects of x-rays in plants. *J. Hered.* 21: 3-19, 1930.
- [17] Caspari E, Stern C. The influence of chronic irradiation with gamma-rays at low dosages on the mutation rate in *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 33(1): 75-95, 1948. doi: 10.1093/genetics/33.1.75.
- [18] Calabrese EJ. Muller's Nobel lecture on dose-response for ionizing radiation: ideology or science? *Arch Toxicol.* 85(12):1495-1498, 2011. doi: 10.1007/s00204-011-0728-8.
- [19] Ogura K, Magae J, Kawakami Y, Koana T. Reduction in mutation frequency by very low-dose gamma irradiation of *Drosophila melanogaster* germ cells. *Radiat Res.* 171(1):1-8, 2009. doi: 10.1667/RR1288.1.
- [20] Koana T, Takahashi T, Tsujimura H. Reduction of spontaneous somatic mutation frequency by a low-dose X irradiation of *Drosophila* larvae and possible involvement of DNA single-strand damage repair. *Radiat Res.* 177(3): 265-271, 2012. doi: 10.1667/rr2630.1.
- [21] Calabrese EJ. The threshold vs LNT showdown: Dose rate findings exposed flaws in the LNT model part 1. The Russell-Muller debate. *Environ Res.* 154: 435-451, 2017. doi: 10.1016/j.envres.2016.12.006.
- [22] BEAR 1956: A Report to the Public. NAS/NRC, Washington, DC, 1956.
- [23] Calabrese EJ, Giordano J. Ethical issues in the US 1956 National Academy of Sciences BEAR I Genetics Panel report to the public. *Health Phys.* 123(5):387-391, 2022. doi: 10.1097/HP.0000000000001608.
- [24] Neel, JV. Letter to BEAR 1 Genetics Panelists. Neel File. American Philosophical Society, Philadelphia, PA, 1956.
- [25] Anonymous. Genetic effects of atomic radiation. *Science* 123 (3209):1157-1164, 1956.
- [26] Lewis EB. Leukemia and ionizing radiation. *Science* 125: 965-972, 1957. doi: 10.1126/science.125.3255.965.
- [27] Calabrese EJ. LNT and cancer risk assessment: its flawed foundations part 1: radiation and leukemia: where LNT began. *Environ. Res.* 197:111025, 2021b. doi: 10.1016/j.envres.2021.111025.
- [28] NCRPM 1959: Somatic radiation dose for the general population. Report of the Ad Hoc Committee of the National Committee on Radiation Protection and Measurements, 6 May 1959. *Science* 131: 482-486, 1960.
- [29] Russell WL, Russell LB, Kelly EM. Radiation dose rate and mutation frequency. *Science* 128(3338): 1546-1550, 1958.
- [30] Calabrese EJ, Selby PB. Background radiation and cancer risks: A major intellectual confrontation within the domain of radiation genetics with multiple converging biological disciplines. *J Occup Environ Hyg.* 20(12): 621-632, 2023. doi: 10.1080/15459624.2023.2252032.
- [31] ICRP 1959. Publication 1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, New York, 1959.

- [32] ICRP 1991. Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP* 21: 1-3, 1991.
- [33] BEIR I 1972. The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Division of Medical Sciences, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D.C. 20006, November 1972.
- [34] BEIR VII Phase 2. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, National Research Council of the National Academies, The National Academies Press; Washington, D.C., 2006, str. 15.
- [35] GAO 2000. Radiation Standards: Scientific Basis Inconclusive, and EPA and NRC Disagreement Continues. Washington, D.C.: GAO; 2000. GAO/RCED-00-152.
- [36] USEPA 2006. Modifying EPA Radiation Risk Models Based on BEIR VII. Washington, D.C.: USEPA, 2006.
- [37] USEPA 2011. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. Washington, D.C.: USEPA, 2011.
- [38] NCRP 2018: Commentary No. 27: Implications of Recent Epidemiologic Studies for the Linear-Nonthreshold Model and Radiation Protection. The National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD, 2018.
- [39] Ulsh BA. A critical evaluation of the NCRP COMMENTARY 27 endorsement of the linear no-threshold model of radiation effects. *Environ Res.* 167:472-487, 2018. doi: 10.1016/j.envres.2018.08.010.
- [40] Chaplin K. Estimating risk and NCRP's Commentary 27. 40th Annual CNS Conference (Virtual)/45th Annual CNS/CNA Student Conference (Virtual, June 6 – June 9, 2021.
- [41] Janiak MK, Pocięgiel M, Welsh JS. Time to rejuvenate ultra-low dose whole-body radiotherapy of cancer. *Crit Rev Oncol Hematol.* 160:103286, 2021. doi: 10.1016/j.critrevonc.2021.103286.
- [42] Janiak MK. Czy małe dawki promieniowania jonizujące są szkodliwe? *Post Tech Jqdr.* 65(2): 11-21, 2022.
- [43] Janiak MK, Waligórski MPR. Can low-level ionizing radiation do us any harm? *Dose Response*. Special Collection: Low-dose scientific debate: data and scientific ethics - a special issue to commemorate Ludwik Dobrzynski, 2023, str. 1-15. doi: 10.1177/15593258221148013.
- [44] Ulsh BA, Calabrese EJ. Time for Radiation Regulation to Evolve. *Regulation*, The Cato Institute's magazine. Fall 2019.
- [45] Feinendegen L. Evidence for beneficial low level radiation effects and radiation hormesis. *Br. J. Radiol.* 78(925):3-7, 2005. doi: 10.1259/bjr/63353075.
- [46] ICRP 2007. Publication 103: the 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP* 37(2-4): 1-135, 2007.
- [47] Siegel JA, Sacks B, Stabin MG. LNT 999. *Health Physics News* 23-24, 2015.
- [48] Siegel JA, Sacks B, Welsh JS. Time to Terminate LNT: Radiation Regulators Should Adopt LT. *J Radiol Oncol.* 1: 049-053, 2017. doi.org/10.29328/journal.jro.1001007.
- [49] Scott BR Some Epidemiologic studies of low-dose radiation cancer risks are misinforming. *Dose Response* 19(2):15593258211024499, 2021. doi: 10.1177/15593258211024499.
- [50] Puskin JS. Perspective on the use of LNT for radiation protection and risk assessment by the U.S. Environmental Protection Agency. *Dose Response* 7(4):284-291, 2009. doi: 10.2203/dose-response.09-005.Puskin.
- [51] Preston RJ, Boice JD Jr, Brill AB, Chakraborty R, Conolly R, Hoffman FO, Hornung RW, Kocher DC, Land CE, Shore RE, Woloschak GE. Uncertainties in estimating health risks associated with exposure to ionising radiation. *J Radiol Prot.* 33(3): 573-588, 2013. doi: 10.1088/0952-4746/33/3/573.
- [52] Shore RE, Beck HL, Boice JD Jr, Caffrey EA, Davis S, Grogan HA, Mettler FA Jr, Preston RJ, Till JE, Wakeford R, Walsh L, Dauer LT. Recent epidemiologic studies and the linear no-threshold model for radiation protection-considerations regarding NCRP Commentary 27. *Health Phys.* 116: 235-246, 2019. doi.org/10.1097/HP.0000000000001015.
- [53] Rothman KJ, Greenland S. *Modern Epidemiology*. 2nd ed., Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA, 1998.
- [54] Cardarelli II JJ, Ulsh BA. It is time to move beyond the linear no-threshold theory for low-dose radiation protection. *Dose Response* 16(3):1559325818779651, 2018. doi: 10.1177/1559325818779651.
- [55] Hansen H. *Fallacies*. The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Stanford, CA: Stanford University; 2015.
- [56] Sacks B, Meyerson G, Siegel JA. Epidemiology without biology: false paradigms, unfounded assumptions, and specious statistics in radiation science (with commentaries by Inge Schmitz-Feuerhake and Christopher Busby and a reply by the authors). *Biol Theory* 11:69-101, 2016. doi: 10.1007/s13752-016-0244-4.
- [57] Scott BR. A critique of recent epidemiologic studies of cancer mortality among nuclear workers. *Dose Response* 16(2):1559325818778702, 2018. doi: 10.1177/1559325818778702.2018.
- [58] Hall EJ. *Radiobiology for the Radiologist*. Fifth edition. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2000.
- [59] Bennett B, Repacholi M, Carr Z. Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Care Programmes. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health". WHO Press, World Health Organization, Geneva, 2006.
- [60] Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. The Chernobyl Forum 2003-2005, 2<sup>nd</sup> revised edition, IAEA, Vienna, 2006. <https://goo.gl/Jcyz8H>.
- [61] Janiak M.K.: *Terroryzm radiacyjny. w: Pokojowe i Terrorystyczne Zagrożenia Radiacyjne*. M.K. Janiak, A. Cheda, E.M. Nowosielska (red.), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2012, str. 57-74. ISBN 83-89379-08-2.
- [62] ICRP 2004. Draft Report of Committee I/Taks Group. Low dose extrapolation of radiation related cancer risk. Dec. 10, 2004.
- [63] Strupczewski A. *Zaufajmy energetyce jądrowej*. Wyd. 2, uzupełnione, NCBJ, Warszawa, 2016, str.57.
- [64] Grant EJ, Furukawa K, Sakata R, Sugiyama H, Sadakane A, Takahashi I, Utada M, Shimizu Y, Ozasa K. Risk of death among children of atomic bomb survivors after 62 years of follow-up: a cohort study. *Lancet Oncol.* 16(13): 1316-1323, 2015. doi: 10.1016/S1470-2045(15)00209-0.

- [65] Thompson RE. Epidemiological evidence for possible radiation hormesis from radon exposure: a case-control study conducted in Worcester, MA. *Dose Response*, 9:59–75, 2011. doi: 10.2203/dose-response.10-026.Thompson.
- [66] Ritchie H. What are the safest and cleanest sources of energy? 2020, published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>.
- [67] Devanney J. Why Nuclear Power has been a Flop at Solving the Gordian Knot of Electricity Poverty and Global Warming. 3<sup>rd</sup> ed., The CTX Press, Stevenson, WA, 2024, str. 37.
- [68] Tubiana M, Aurengo A, Averbek D, et al. Dose-Effect Relationship and Estimation of the Carcinogenic Effects of Low Doses of Ionizing Radiation. Académie Nationale de Médecine, Institut de France Académie de Science; Joint report no. 2, Nucléon, March 30, 2005.
- [69] UNSCEAR 2012. Report of the United Nations Sci Committee on the Effects of Atomic Radiation Report No. A/67/46, UNSCEAR, New York, 2012.
- [70] USEPA 2018. Environmental Protection Agency (EPA). Proposed rule. Strengthening transparency in regulatory science. *Fed. Reg.* 83(83):18768–18774, 2018.
- [71] Golden R, Bus J, Calabrese E. An examination of the linear no-threshold hypothesis of cancer risk assessment: Introduction to a series of reviews documenting the lack of biological plausibility of LNT. *Chem Biol Interact.* 301:2–5, 2019. doi:10.1016/j.cbi.2019.01.038.
- [72] Scott BR, Tharmalingam S. The LNT model for cancer induction is not supported by
- [73] radiobiological data. *Chem Biol Interact* 301: 34–53, 2019. doi: 10.1016/j.cbi.2019.01.013.
- [74] Vaiserman A., Cuttler JM, Socol Y. Low-dose ionizing radiation as a hormetin: experimental observations and therapeutic perspective for age-related disorders. *Biogerontology* 22(2): 145-164, 2021. doi: 10.1007/s10522-020-09908-5.
- [75] Jaworowski Z. Hormesis: The beneficial effects of radiation. *21st Century* 7:22-26, 1994.
- [76] Jaworowski Z. Observations on the Chernobyl disaster and LNT. *Dose Response* 8(2):148-171, 2010. doi: 10.2203/dose-response.09-029.Jaworowski.
- [77] Jaworowski Z. Radiation folly. w: Environment and Health. Myths and Realities, K. Okonski i J. Morris (wyd.), Int. Policy Press, 2003, str. 68-86.
- [78] Waligórski MPR. On the present paradigm of radiation protection - A track structure perspective. *Nukleonika* 42(4):889-894, 1997.
- [79] Higson DJ. The bell tolls for LNT. *Health Phys.* 87(5 Suppl): S47-50, 2004. doi: 10.1097/00004032-200411002-00004.
- [80] Hooker AM, Bhat M, Day TK, Lane JM, Swinburne SJ, Morley AA, Sykes PJ. The linear no-threshold model does not hold for low-dose ionizing radiation. *Radiat Res.* 162(4): 447-452, 2004. doi: 10.1667/rr3228.
- [81] Tubiana M, Aurengo A, Averbek D, Masse R. The debate on the use of linear no threshold for assessing the effects of low doses. *J Radiol Prot* 26(3):317-324, 2006. doi: 10.1088/0952-4746/26/3/N01.
- [82] Tubiana M, Feinendegen LE, Yang C, Kaminski JM. The linear no-threshold relationship is inconsistent with radiation biologic and experimental data. *Radiology* 251(1):13-22, 2009. doi: 10.1148/radiol.2511080671.
- [83] Ulsh BA. Checking the foundation: recent radiobiology and the linear no-threshold theory. *Health Phys.* 99(6):747-758, 2010.
- [84] Dobrzyński L, Janiak MK, Strupczewski A, Waligórski M. 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). *Postech Jqdr.* 60(3): 2-11, 2017.
- [85] Sacks B, Siegel JA. Preserving the anti-scientific linear no-threshold myth: authority, agnosticism, transparency, and the standard of care. *Dose Response* 15(3):1-4, 2017. doi: 10.1177/1559325817717839.
- [86] Welsh JS, Sacks B, Siegel JA. Time to eliminate LNT: the NRC needs to adopt LT and eliminate ALARA. *Nucl Med Biomed Imaging* 2(1):1-5, 2017.
- [87] Doss M. Are we approaching the end of the linear no-threshold era? *Nucl Med.* 2018; 59:1786–1793, 2018. doi: 10.2967/jnumed.118.217182.
- [88] Hansen CL, Hingorani R. LNT RIP: It is time to bury the linear no threshold hypothesis.
- [89] *J Nucl Cardiol.* 26(4): 1358-1360, 2019. doi: 10.1007/s12350-019-01646-7.
- [90] Kaminski CY, Dattoli M, Kaminski JM. Replacing LNT: The integrated LNT-hormesis model. *Dose Response* 18(2):1559325820913788, 2020. doi: 10.1177/1559325820913788.
- [91] Sykes, P. Until there is a resolution of the pro-LNT/anti-LNT debate, we should head toward a more sensible graded approach for protection from low-dose ionizing radiation. *Dose Response* 18(2):1559325820921651, 2020. doi: 10.1177/1559325820921651.
- [92] Doss M. Facilitating the end of the linear no-threshold model era. *J Nucl Med* 00:1–2, 2024. doi: 10.2967/jnumed.124.267868.
- [93] Kino K. Calculations of the radiation dose for the maximum hormesis effect. *Radiation* 4: 69–84, 2024. doi: org/10.3390/radiation4010006.
- [94] Scott BR. A revised system of radiological protection is needed. *Health Phys.* 126(6): 419–423, 2024. doi: 10.1097/HP.0000000000001791.
- [95] Scott BR, Walker DM, Tesfaigzi Y, Schöllnberger H, Walker H. Mechanistic basis for nonlinear dose-response relationships for low-dose radiation-induced stochastic effects. *Nonlinearity Biol Toxicol Med.* 1(1): 93-122, 2003. doi: 10.1080/15401420390844492.