

Model LNT a ochrona radiologiczna w zakresie niskich dawek: stan wiedzy i propozycje zmian regulacyjnych w USA

The LNT Model and Radiation Protection at Low Doses: State of Knowledge and Regulatory Changes Proposals in the USA

Agnieszka Szumska
Instytut Fizyki Jądrowej

Streszczenie: Model liniowy bezprogowy (ang. *LNT – Linear No-Threshold*) od dziesięcioleci stanowi jedno z podstawowych założeń wykorzystywanych w systemie ochrony radiologicznej do oceny i zarządzania ryzykiem skutków stochastycznych przy małych dawkach. Nie jest on jednak tożsamy z całym systemem ochrony radiologicznej, który opiera się przede wszystkim na zasadach uzasadnienia, optymalizacji i ograniczenia dawek [1–3, 9].

Współczesna radiobiologia dostarczyła rozbudowanej wiedzy o odpowiedzi komórkowej na promieniowanie. Poznano dokładniej mechanizmy uszkodzeń i naprawy DNA, procesy eliminacji uszkodzonych komórek, odpowiedzi adaptacyjne, efekty sąsiedztwa czy niestabilność genomową. Mechanizmy te zwiększają złożoność biologicznej odpowiedzi na małe dawki, nie doprowadziły one jednak dotąd do wyznaczenia powszechnie zaakceptowanego, uniwersalnego progu bezpieczeństwa ani alternatywnego modelu ryzyka nowotworowego, który sprawdziłby się we wszystkich zastosowaniach ochrony radiologicznej. Publikacja 99 wydana przez ICRP jasno wskazuje, że przy niskich dawkach występują istotne niepewności, co sprawia, że LNT pozostaje ostrożną i zachowawczą podstawą ochrony radiologicznej [3].

Równolegle rozwija się obszerne badania epidemiologiczne analizujące przewlekłe narażenie na niskie dawki. Wyniki badań wielkich kohort, takich jak *INWORKS* czy *Million Person Study*, dostarczają kolejnych danych o zależnościach dawka–ryzyko, jednak ich interpretacja nie powinna być utożsamiana z bezpośrednim dowodem na to, że ryzyko spada liniowo aż do zera [5, 13].

Sz szczególnie interesującym przykładem toczącej się dziś debaty regulacyjnej są Stany Zjednoczone. Tamtejsza komisja dozoru jądrowego NRC (ang. *Nuclear Regulatory Commission*) w 2026 roku zaproponowała rewizję ram ochrony radiologicznej, w tym ponowne rozważenie sposobu wykorzystywania modelu LNT i zasady optymalizacji. Mimo że jest to na razie wyłącznie projekt, znaczenie wywołanej nim debaty mocno wykracza poza USA i z pewnością stanie się ważnym punktem odniesienia dla przyszłych dyskusji międzynarodowych [11].

Słowa kluczowe: Model LNT, ochrona radiologiczna, niskie dawki promieniowania, regulacje NRC.

Abstract: The Linear No-Threshold (LNT) model has for decades been one of the fundamental assumptions used in the radiation protection system to assess and manage the risk of stochastic effects at low doses. However, it is not synonymous with the entire radiation protection system, which is primarily based on the principles of justification, optimization, and dose limitation [1–3, 9].

Modern radiobiology has provided extensive knowledge about the cellular response to radiation. The mechanisms of DNA damage and repair, processes of eliminating damaged cells, adaptive responses, bystander effects, and genomic instability are now more thoroughly understood. These mechanisms increase the complexity of the biological response to low doses; however, they have not yet led to the establishment of a universally accepted safety threshold or an alternative cancer risk model that would be applicable across all radiation protection applications. ICRP Publication 99 clearly indicates that significant uncertainties exist at low doses, making LNT a cautious and conservative basis for radiation protection [3].

Concurrently, extensive epidemiological research analyzing chronic low-dose exposure is being conducted. The results of large cohorts, such as INWORKS or the Million Person Study, provide further data on dose–risk relationships; however, their interpretation should not be equated with direct evidence that the risk decreases linearly all the way down to zero [5, 13].

The United States serves as a particularly interesting example of the ongoing regulatory debate. In 2026, the US Nuclear Regulatory Commission (NRC) proposed a revision of the radiation protection framework, including a reconsideration of how the LNT model and the optimization principle are utilized. Although this is currently only a regulatory draft, the significance of this debate extends far beyond the US and will certainly become a crucial reference point for future international discussions [11].

Keywords: LNT model, radiation protection, low radiation doses, NRC regulations.

1. Wprowadzenie Paradygmat ochrony radiologicznej



Współczesny system ochrony przed promieniowaniem jonizującym, kształtowany od dziesięcioleci przez rekomendacje Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ang. ICRP – *International Commission on Radiological Protection*) (w szczególności publikacja nr 103) oraz Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA, ang. IAEA – *International Atomic Energy Agency*), opiera się na trzech podstawowych zasadach: uzasadnieniu, optymalizacji i limitowaniu dawek. Należy przy tym zaznaczyć, że ostatnie z tych kryteriów nie ma zastosowania u pacjentów w celach medycznych, gdzie priorytetem jest skuteczność diagnozowania i terapii indywidualnego pacjenta. W prawie europejskim zasady te zostały ujęte w art. 5 dyrektywy 2013/59/Euratom [1, 2].

Ochrona radiologiczna nieustannie poszukuje równowagi pomiędzy korzyściami wynikającymi z wykorzystania promieniowania jonizującego a potencjalnym ryzykiem dla zdrowia i środowiska naturalnego. Ustalenia naukowe przekładają się z czasem na normy prawne w zakresie ochrony radiologicznej, które stanowią część szerszego systemu prawa energii jądrowej.

LNT jest jednym z modeli wykorzystywanych w ocenie ryzyka skutków stochastycznych. Zgodnie z pojęciem całkowitego uszczerbku na zdrowiu, zdefiniowanym w publikacji ICRP 103 [4], kategoria ta obejmuje nie tylko ryzyko nowotworowe (wynikające z mutacji w komórkach somatycznych), ale także stochastyczne efekty dziedziczne (będące następstwem mutacji w linii zarodkowej). Model LNT odnosi się do obu tych zjawisk, jednak trzeba tu podkreślić fundamentalną różnicę w bazie dowodowej. O ile ekstrapolacja ryzyka nowotworowego bazuje na obszernych danych epidemiologicznych u ludzi (np. badanie LSS – *Life Span Study* [3, 6]), o tyle szacunki dotyczące efektów dziedzicznych opierają się na ekstrapolacji wyników z eksperymentów *in vivo* na zwierzętach. U ludzi – nawet podczas wieloletnich obserwacji kohorty ocalałych z bombardowań w Japonii – nie wykazano dotychczas statystycznie istotnego wzrostu popromiennych efektów dziedzicznych. Warto również przypomnieć, że model ten nie dotyczy odczynów tkankowych (określanych jako skut-

ki deterministyczne, np. zaćmy czy rumienia popromiennego). W ich przypadku współczesna radiobiologia i ochrona radiologiczna posługuje się wartościami progowymi lub zakresami dawek progowych, których wielkość zależy m.in. od rodzaju efektu tkankowego, narażonego narządu, a także czasu czy specyfiki ekspozycji. Model LNT przyjmuje, że na potrzeby ochrony radiologicznej w zakresie małych dawek ryzyko można przybliżać za pomocą zależności liniowej. Nie oznacza to jednak, że każda pojedyncza ekspozycja powoduje mierzalny wzrost zachorowań, który dałoby się bezpośrednio wykryć narzędziami epidemiologicznymi.

LNT należy również odróżnić od zasady optymalizacji. Optymalizacja nie oznacza sprowadzania każdej dawki do minimum bez względu na koszty. Jej celem jest osiągnięcie racjonalnego poziomu ochrony z uwzględnieniem czynników technicznych, ekonomicznych, zdrowotnych i społecznych [1, 2].

1.1. Podstawy biologiczne i kontrowersje wokół niskich dawek

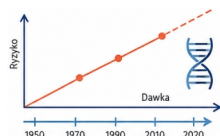
W zakresie dawek powyżej 100 mGy dysponujemy silnymi i spójnymi dowodami epidemiologicznymi (np. z kohorty LSS) potwierdzającymi wzrost ryzyka nowotworowego. Sytuacja komplikuje się jednak wraz ze spadkiem dawki pochłoniętej poniżej wartości 100 mGy. Statystyczne wychylenie minimalnego przyrostu ryzyka na tle powszechnej, naturalnej zapadalności na nowotwory w społeczeństwie staje się wówczas niemożliwe ze względu na bariery związane z mocą statystyczną badań. Aby skutecznie dowieść nadmiarowego ryzyka przy dawkach rzędu kilku miligrejów (mGy), musielibyśmy badać kohorty o nierealistycznie gigantycznych rozmiarach. Brak bezpośrednich, bezspornych dowodów w rejonie najniższych dawek jest zatem w równej mierze wynikiem statystycznego szumu, co ogromnej złożoności odpowiedzi organizmu. Niemniej jednak, współczesne analizy epidemiologiczne dostarczają nam danych także dla przewlekłego narażenia na relatywnie małe dawki.

Rozwój wiedzy na temat odpowiedzi adaptacyjnej, efektów sąsiedztwa (ang. *bystander effects*), niestabilności genomowej czy zjawiska określanego jako hormeza radiacyjna wyraźnie ukazuje, jak wielowymiarowa jest biolo-

giczna reakcja na małe dawki. Nauka zidentyfikowała szereg procesów modyfikujących odpowiedź tkanek, w tym mechanizmy naprawy DNA, zatrzymania cyklu komórkowego, apoptozy oraz reakcje ze strony układu immunologicznego. Zidentyfikowanie tych zjawisk nie jest jednak równoznaczne z wykazaniem istnienia uniwersalnego progu ryzyka nowotworowego dla człowieka. Brak takich dowodów nie przesądza wprawdzie o liniowości zależności dawka–ryzyko, ale to właśnie zbiorcza ocena dostępnych danych epidemiologicznych, ustaleń radiobiologii i modeli ryzyka stanowi uzasadnienie dalszego stosowania LNT. Zarówno Komitet ONZ ds Skutków Promieniowania Atomowego (ang. UNSCEAR – *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*), jak i ICRP konsekwentnie przypominają, że w obszarze niskich dawek panuje niepewność obejmująca nie tylko samą skalę ryzyka, ale też precyzyjny kształt krzywej dawka–odpowiedź [3, 9].

Wiele emocji w badaniach eksperymentalnych budzi zjawisko hormezy radiacyjnej. Choć w wybranych układach biologicznych rzeczywiście zaobserwowano reakcje adaptacyjne lub stymulujące, nie mamy dziś wystarczających naukowych podstaw, by przyjąć hormezę jako uniwersalny standard ochrony radiologicznej bądź by uznać małe dawki za zjawisko profilaktycznie korzystne dla populacji.

2. Geneza, ewolucja i założenia modelu LNT



Historia LNT nie opiera się na jednym, przełomowym eksperymencie ani na jednej decyzji administracyjnej. Choć wczesne badania Hermanna Mullera nad indukowaniem mutacji u muchówek (*Drosophila*) miały spory wpływ na rozwój koncepcji zależności dawka–efekt, to ostateczny kształt całego systemu ochrony radiologicznej był wynikiem wielu dekad prac eksperymentalnych, epidemiologicznych i regulacyjnych.

2.1. Źródło danych

Jednym z najważniejszych źródeł danych epidemiologicznych pozostaje *Life Span Study* (LSS) ocalałych z wybuchów bomb atomowych w Hiroszynie i Nagasaki. Kohorta ta dostarczyła kluczowych danych o zależności pomiędzy narażeniem na promieniowanie a ryzykiem nowotworowym. Mimo to LSS nie jest gotowym dowodem potwierdzającym trafność LNT „aż do samego zera”. Przenoszenie tych wyników na obszar małych dawek staje się w dużej mierze kwestią modelowania statystycznego. Dane z LSS są w pełni miarodajne tam, gdzie liczba przypadków pozwala na pewne oszacowanie parametrów. Im niższa dawka, tym większa niepewność, a jednoznaczne rozstrzygnięcie, który z konkurencyjnych modeli ryzyka jest najtrafniejszy, staje się coraz trudniejsze [3, 6].

2.2. Odpowiedź komórkowa a dane epidemiologiczne

Radiobiologia i epidemiologia odpowiadają na różne pytania. Badania komórkowe pozwalają identyfikować mechanizmy, które mogą wpływać na odpowiedź organizmu. Badania epidemiologiczne pozwalają natomiast oceniać, czy w populacji występuje mierzalny nadmiar zachorowań lub zgonów związany z określonym narażeniem.

Najnowsze analizy kohortowe poszerzają naszą bazę danych o skutki przewlekłego narażenia. W aktualizacji badania INWORKS z 2024 roku dowiedziono istnienia statystycznych zależności między kumulowaną dawką zawodową a ryzykiem zgonu na określone nowotwory (w tym układu krwiotwórczego). Trzeba tu jednak bardzo rygorystycznie oddzielić populacyjną analizę całego trendu od ryzyka indywidualnego. Modele statystyczne rysują obraz dystrybucji ryzyka w dużej grupie, zatem nie można ich traktować jako dowodu na to, że u konkretnego człowieka, który przyjął dawkę rzędu kilkunastu miligrejów (mGy), wystąpi klinicznie mierzalny wzrost ryzyka kancerogenezy [5].

Podobnych wniosków dostarczyło opublikowane w 2025 roku badanie *Million Person Study*, analizujące śmiertelność na nowotwory łagodne wśród pracowników narażonych na promieniowanie. W tym przypadku sami autorzy zastrzegają obecność istotnych ograniczeń interpretacyjnych, wynikających m.in. z braku pełnych danych o zewnętrznych, niezwiązanych z promieniowaniem czynnikach środowiskowych czy innych źródłach narażenia [13].

3. Wyzwania praktyczne i koszty społeczno-gospodarcze



3.1. Lekcja z Fukushima

Katastrofa w Fukushima Daiichi pokazuje, że konsekwencje sytuacji radiacyjnej nie ograniczają się wyłącznie do bezpośrednich efektów zdrowotnych wynikających z samego narażenia radiologicznego (otrzymanych dawek). Z raportów UNSCEAR wynika, że w lokalnej populacji nie stwierdzono skutków zdrowotnych, które dałoby się bezpośrednio i jednoznacznie powiązać z napromienianiem. Równocześnie jednak działania prewencyjne – takie jak masowa ewakuacja, zerwanie więzi społecznych, długotrwałe przesiedlenia, ogromny stres oraz zakłócenia w funkcjonowaniu opieki zdrowotnej – pociągnęły za sobą bardzo realne, tragiczne konsekwencje zdrowotne [9].

Z tego względu doświadczenie Fukushima powinno być traktowane przede wszystkim jako argument za proporcjonalnym zarządzaniem ryzykiem i wysoką jakością komunikacji ze społeczeństwem, a nie jako prosty dowód potwierdzający słuszność lub błędy modelu LNT.

3.2. Bariera dla reaktorów energetycznych i medycyny

Wymagania dotyczące ochrony radiologicznej są jednym z elementów wpływających na koszty projektowania i eksploatacji instalacji jądrowych oraz obiektów wykorzystujących promieniowanie jonizujące. Rzeczywisty poziom tych kosztów zależy od wybranej technologii, wymagań lokalnego regulatora i samego procesu optymalizacji. Problem ten doskonale widać przy projektowaniu stałych osłon w nowoczesnych zakładach radioterapii, a w szczególności podczas planowania lokalizacji reaktorów energetycznych w pobliżu dużych aglomeracji miejskich. Dla branży jądrowej fundamentalnym wyzwaniem komercyjnym i społecznym jest możliwość zawężenia strefy planowania awaryjnego (ang. EPZ – *Emergency Planning Zone*) wyłącznie do obrysu fizycznego samego obiektu. W tym kontekście główną przeszkodą nie jest sam model LNT, lecz konieczność zastąpienia skrajnie konserwatywnych założeń (dotyczących np. modeli dyspersji atmosferycznej czy scenariuszy uwalniania radionuklidów) nowym podejściem typu *risk-informed*, które opierałoby się na realistycznych symulacjach zachowania reaktora. Obecne wysokie koszty systemów zabezpieczeń i osłon wynikają z rygorystycznych przepisów, które w obowiązującym stanie prawnym rzadko potrafią sprawiedliwie zróżnicować skalę zagrożenia adekwatnie do innowacyjności i bezpieczeństwa różnych projektów reaktorów włącznie z małymi reaktorami modułowymi (SMR) [7, 8].



4. Debata regulacyjna w USA

Obecnie to w Stanach Zjednoczonych toczą się najważniejsze dyskusje o nowych przepisach i modelach radiologicznych. Wynika to z faktu, że USA mają ogromne zaplecze naukowe i bardzo wpływowe organizacje (takie jak *Health Physics Society* – HPS czy *American Nuclear Society* – ANS). To właśnie tam zwolennicy zmian spierają się z obrońcami dotychczasowych zasad. Przez lata debata ta tkwiła w martwym punkcie, jednak ostatnio doprowadziła do propozycji poważnych reform w prawie.

4.1. Okres stabilizacji i utrzymania status quo (2015–2021)

Spór o model LNT w USA tlił się od lat. Debata w USA nabrała tempa w 2015 r., gdy złożono petycje postulujące całkowite odrzucenie modelu LNT na rzecz rozwiązań uwzględniających zjawisko hormezy. Podnoszono w nich, że LNT ignoruje naturalne procesy ewolucyjne, wywołuje niepotrzebną radiofobię i generuje straty idące w miliardy dolarów.

Analiza tych petycji zajęła regulatorowi długie lata. Ostatecznie, 17 sierpnia 2021 r., U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) oficjalnie odrzuciła petycje o zmianę

przepisów. Komisja uzasadniła to faktem, że choć nauka dostarcza nowych danych z zakresu biologii komórkowej, brakuje twardych podstaw, by zastąpić LNT innym modelem w ramach ogólnego systemu ochrony. Utrzymano wówczas model liniowy jako rozwiązanie najbardziej zachowawcze, zapewniające odpowiedni poziom bezpieczeństwa (ang. *adequate protection*) [10].

4.2. Punkt zwrotny: Dekrety prezydenckie i reformy (2025)

Całkowity zwrot akcji przyniósł rok 2025. Pod presją kryzysu energetycznego, pilnej potrzeby dekarbonizacji gospodarki i fatalnych zatorów administracyjnych uderzających w innowacyjne projekty (zwłaszcza SMR) amerykańska administracja wydała dwa przełomowe dekrety:

- **Executive Order 14300** (ang. *Ordering the Reform of the NRC*), wymuszający na komisji gruntowną rewizję przestarzałych przepisów regulacyjnych,
- **Executive Order 14303** (ang. *Restoring Gold Standard Science*), obligujący do tego, by polityka państwa opierała się wyłącznie na weryfikowalnych dowodach o bezwzględnie najwyższym standardzie empirycznym.

Dokumenty te nadały kierunek reformie regulacyjnej, obejmującej m.in. większe wykorzystanie podejścia *risk-informed* oraz ocenę proporcjonalności wymagań regulacyjnych.

Debata w USA w 2025–2026 roku przesunęła się z pytania „czy LNT jest prawdziwy?” w stronę szerszego pytania: w jaki sposób oceniać ryzyko w codziennych decyzjach administracyjnych i jak proporcjonalnie dopasowywać rygory do rzeczywistego zagrożenia.

Dekrety z 2025 roku i wynikające z nich działania NRC to element szerszej reformy państwowej. Zwrócenie się w stronę podejścia *risk-informed* nie oznacza jednak wykreślenia dotychczasowych modeli radiobiologicznych z ram prawnych ani oficjalnego, urzędowego zatwierdzenia istnienia progu biologicznego.

4.3. Proponowane zmiany regulacyjne i perspektywa 2026 roku

Kulminacją tych procesów było opublikowanie przez NRC 15 lipca 2026 roku projektu „*Reforming and Modernizing the NRC’s Radiation Protection Framework*” (Docket ID NRC-2025-1140). Dokument ten ma charakter projektu przepisów (*proposed rule*), podlegającego szerokim konsultacjom społecznym (z terminem zgłaszania uwag przypadającym na 31 sierpnia 2026 r.), a nie gotowego i obowiązującego prawa. W jego treści wprost podnosi się kwestię ponownego przeanalizowania roli LNT i mechanizmów optymalizacji w praktyce administracyjnej [11].

Dla ekspertów z Europy najważniejszy wniosek brzmi: projekt z 2026 roku nie jest naukowym obaleniem dogmatów LNT. To raczej próba przededefiniowania sposobu, w jaki niepewność dotycząca ryzyka ma być przekładana na

twarde wymagania techniczne. Należy zatem ostrożnie operować tezami, że „USA odchodzą od LNT”, zaznaczając zawsze, iż dotyczy to przede wszystkim reformowania mechanizmów regulacyjnych i prawnych.

Na dzień przygotowania niniejszej wersji termin zgłaszania uwag do projektu przypada na 31 sierpnia 2026 roku. Ostateczny kształt regulacji może więc jeszcze ulec zmianie [11].

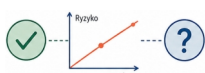


5. Rozwój podejścia ICRP

Debata nad małymi dawkami nie ogranicza się tylko do USA. Międzynarodowa dyskusja toczy się również na forum ICRP. ICRP prowadzi i publikuje prace dotyczące naukowych podstaw oceny ryzyka przy niskich dawkach i niskich mocach dawki. Szczególne znaczenie ma ICRP Publication 99 [3], w której po skrupulatnej analizie zebranych dowodów epidemiologicznych i biologicznych potwierdzono ogromne niepewności w strefie najniższych dawek. Mimo to komisja nie znalazła argumentów za przyjęciem uniwersalnego progu i nadal traktuje model LNT jako racjonalne, ostrożnościowe założenie [3].

Baza naukowa wciąż ewoluuje, o czym świadczą obecne prace ICRP poświęcone m.in. nowotworom litym przy bardzo małym narażeniu oraz tematowi indywidualnej wrażliwości człowieka. Prowadzenie tego typu badań nie oznacza jednak w żadnym wypadku utraty podstaw obecnego systemu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej.

6. Co jest dobrze ustalone, a co pozostaje niepewne?



Z perspektywy współczesnej wiedzy:

6.1. Dobrze ustalone:

- wysokie dawki promieniowania jonizującego indukują odczyny tkankowe (po przekroczeniu odpowiednich progów dawki) oraz proporcjonalnie zwiększają prawdopodobieństwo wystąpienia stochastycznych efektów późnych (nowotworów);
- ryzyko zależy m.in. od dawki, rodzaju promieniowania, wieku w chwili ekspozycji, płci, narządu i czasu oraz sposobu narażenia;
- przy niskich dawkach i małych mocach dawki niepewność statystyczna i biologiczna jest większa niż przy wysokich dawkach;
- istnieją epidemiologiczne dane dotyczące przewlekłego narażenia zawodowego na relatywnie niskie dawki, m.in. z badań *INWORKS* i *Million Person Study* [5, 13].

6.2. Niepewne:

- dokładny kształt zależności dawka–ryzyko dla wszystkich nowotworów w najniższym zakresie dawek;
- dokładna wielkość efektu mocy dawki i jego zależność od rodzaju nowotworu oraz sposobu ekspozycji;
- znaczenie indywidualnej podatności genetycznej i innych cech osobniczych dla ryzyka przy małych dawkach;
- istnienie jednego uniwersalnego progu lub uniwersalnego korzystnego efektu małych dawek dla ryzyka nowotworowego w populacji;

Nie istnieje zatem obecnie żaden powszechnie zaakceptowany alternatywny jeden model, który zastąpiłby LNT we wszystkich zastosowaniach ochrony radiologicznej.



7. Znaczenie dla ochrony radiologicznej w Polsce

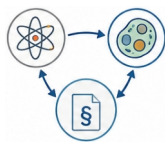
Debata w USA i rozwój prac ICRP stanowią ważny materiał analityczny dla Polski, ale nie oznaczają konieczności automatycznego kopiowania rozwiązań zza oceanu. Krajowy system ochrony radiologicznej funkcjonuje w ramach prawa krajowego oraz prawa europejskiego.

Prezes PAA prowadząc nadzór nad bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną opiera się na przepisach Prawa atomowego [12], uwzględniającego zarówno dorobek ICRP jak i IAEA, zgodnego także z prawem europejskim, którego ramy dotyczące omawianej kwestii określa dyrektywa 2013/59/Euratom, trzymająca się sprawdzonych filarów: uzasadnienia, optymalizacji i ograniczania dawek [1, 2].

8. Środowisko dozymetryczne w Europie



Europejskie środowisko ochrony radiologicznej i dozymetrii z uwagą śledzi globalne dyskusje na ten temat. Grupa EURADOS (*European Radiation Dosimetry Group*), sieć zrzeszająca obecnie 85 instytucji, głównie europejskich (członków z prawem głosu), oraz ponad 650 naukowców (członków stowarzyszonych), zorganizowała otwarte debaty nad przyszłością LNT i dozymetrii (m.in. w lutym br. podczas corocznego spotkania, które odbyło się w Helsinkach; kolejne spotkanie odbędzie się w lutym 2027 roku i będzie organizowane wspólnie z MAEA), a kolejna szeroka dyskusja pod prowokacyjnym tytułem: „Are we too conservative in radiation protection?” zaplanowana jest podczas konferencji *European Radiation Protection Week 2026* (ERPW 2026), która odbędzie się w dniach 5–9 października w Berlinie.



9. Podsumowanie

Model LNT stanowi użyteczny, ale nie jedyny element ochrony radiologicznej. Nie jest on bezpośrednim opisem wszystkich procesów biologicznych zachodzących po ekspozycji na promieniowanie ani nie stanowi samodzielnej zasady prawnej. Jest on w istocie modelem pozwalającym na ostrożne szacowanie ryzyka stochastycznego w przedziałach dawek, dla których nie dysponujemy twardymi dowodami epidemiologicznymi.

O ile mechanizmy działania przy wysokich dawkach rozumiemy dziś bardzo dobrze, o tyle w rejonie dawek najniższych musimy borykać się z poważnymi niepewnościami naukowymi. Radiobiologia nie daje nam dziś pewności, że małe dawki są obojętne lub zawsze korzystne, a jednocześnie sam fakt istnienia drobnych uszkodzeń na poziomie komórkowym nie przesądza jeszcze o liniowym przebiegu krzywej ryzyka w skali całej populacji.

Rozpatrując te kwestie, eksperci powinni ściśle odróżniać trzy wymiary: czysto fizyczną zdolność promieniowania do uszkodzania komórek, epidemiologiczną ocenę zachorowań oraz administracyjno-prawny wymiar wykorzystywania modelu LNT w tworzeniu prawa oraz jego stosowaniu przez organy dozoru jądrowego. Wnioski z rozważań prowadzonych w ramach każdego z tych wymiarów rzadko się wzajemnie pokrywają. Mimo swych niedoskonałości LNT pozostaje ostrożnym standardem, a główną areną naukowej niepewności jest dokładny kształt biologicznej krzywej ryzyka w strefie najniższych narażeń.

Debata regulacyjna w USA jest szczególnie interesująca dlatego, że dotyczy nie tylko samego modelu LNT, lecz także sposobu przekładania niepewności naukowej na wymagania prawne. Projekt NRC z 2026 roku powinien być analizowany jako propozycja reformy regulacyjnej, a nie jako naukowe obalenie LNT.

Dla przyszłości ochrony radiologicznej kluczowa będzie dalsza integracja epidemiologii, radiobiologii, dozymetrii i analizy niepewności. Równie ważne będzie zachowanie proporcjonalności wymagań oraz przejrzyste komunikowanie tego, co jest dobrze ustalone, a co pozostaje przedmiotem badań.

Notka o autorce

Dr inż. Agnieszka Szumska jest od ponad 15 lat związana z Instytutem Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, gdzie obecnie pełni m.in. funkcję

Inspektora Ochrony Radiologicznej. Jest aktywną uczestniczką, prelegentką oraz współorganizatorką międzynarodowych i ogólnopolskich konferencji, a także autorką i współautorką publikacji poświęconych praktycznym aspektom pomiarów promieniowania jonizującego. Zasiada w Radzie EURADOS, gdzie od ponad dekady uczestniczy w badaniach prowadzonych w grupach roboczych WG1 i WG2 tej organizacji. Pełni funkcję reprezentantki w *European Metrology Network for Radiation Protection* w ramach EURAMET (ang. *European Association of National Metrology Institutes*) oraz jest członkinią Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej (SIOR).



Literatura

1. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down *basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation*. Official Journal of the European Union. 2014.
2. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: *International Basic Safety Standards*. General Safety Requirements Part 3 (GSR Part 3). IAEA, Vienna.
3. ICRP. *Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk*. ICRP Publication 99. Ann ICRP. 2005;35(4).
4. ICRP. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103. Ann ICRP. 2007;37(2-4):1-332.
5. Leuraud K. et al. *Leukaemia, lymphoma, and multiple myeloma mortality after low-level exposure to ionising radiation in nuclear workers (INWORKS): updated findings from an international cohort study*. Lancet Haematology. 2024;11(10):e761-e769.
6. National Research Council. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2*. Washington, DC: National Academies Press; 2006.
7. OECD/NEA. *Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders*. NEA No. 7616. OECD Publishing, Paris; 2020.
8. OECD/NEA. *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*. NEA No. 7560. OECD Publishing, Paris; 2021.40; RIN 3150-AL47.
9. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report. Scientific Annex C: *Biological mechanisms relevant for the inference of cancer risks from low-dose and low-dose-rate radiation*. United Nations, New York; 2021, with corrigendum 2022.
10. U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Linear No-Threshold Model and Standards for Protection Against Radiation; Denial of Petitions for Rulemaking*. Federal Register. 2021;86:45923. 17 August 2021.
11. U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Reforming and Modernizing the NRC's Radiation Protection Framework. Proposed Rule*. Docket ID NRC-2025-1140; RIN 3150-AL47. 15 July 2026.
12. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe. Dz.U. z 2026 r. poz. 1.
13. Walsh L., Cohen S.S., Dauer L.T., Mumma M.T., Boice J.D. Jr. *Cancer Mortality after Protracted Low-level Radiation Exposure for Early and Contemporary Workers in Two Large Occupational Cohorts in the U.S. Million Person Study*. Radiation Research. 2025;204(5):529-536. doi:10.1667/RADE-24-00271.1.