
Czy małe dawki promieniowania jonizującego są szkodliwe?

Marek Krzysztof Janiak*

Abstrakt. Hipoteza liniowej, bezprogowej zależności (ang. *linear, no-threshold, LNT*) między dawką promieniowania jonizującego (p.j.) a wywołanym przez nią skutkiem zakłada, że każda, nawet najmniejsza dawka pochłoniętego przez organizm człowieka p.j. może prowadzić do rozwoju nowotworu ciągle stanowi podstawę regulacji w ochronie radiologicznej. W pracy, po krótkiej rekapitulacji genezy hipotezy LNT, podano przykłady wyników analiz epidemiologicznych i badań prowadzonych na zwierzętach doświadczalnych świadczących, że hipoteza ta nie ma podstaw naukowych i że jej stosowanie utrudnia lub uniemożliwia wykorzystanie ekspozycji w niskich dawkach p.j. w diagnostyce i terapii chorób. Pora więc najwyższa aby porzucić fałszywą i szkodliwą hipotezę LNT na rzecz modelu progowego lub hormetycznego opartego na współczesnej wiedzy o działaniu niskich dawek p.j.

Słowa kluczowe: promieniowanie jonizujące, hipoteza LNT, ochrona radiologiczna, dane epidemiologiczne i doświadczalne.

Abstract. The linear, no threshold (LNT) hypothesis assuming that all ionizing radiation is harmful and that even the smallest absorbed dose of radiation may be carcinogenic constitutes the basis of radiation protection regulations. The present review briefly recapitulates the genesis of the LNT dogma and provides examples of results of both epidemiological and experimental studies indicating that the dogma is false and unscientific and, when applied in practice, begets more harm than good. Hence, the time is ripe, if not long overdue, to place cancer risk assessment on the biologically based and fully transparent foundations.

Keywords: ionizing radiation, LNT hypothesis, radiation protection, epidemiological and experimental evidence

Według powszechnej opinii każda ekspozycja na promieniowanie jonizujące (p.j.) stanowi poważne, nawet śmiertelne, zagrożenie dla człowieka. Ta radiofobia wynika przede wszystkim z braku właściwej wiedzy o biomedycznym działaniu, szczególnie małych dawek, p.j. (zwanym też niskimi) oraz ze stosowanej w ochronie radiologicznej hipotezy liniowej, bezprogowej (ang. *linear, no-threshold, LNT*) zależności między dawką pochłoniętego promieniowania a jego skutkiem. Geneza hipotezy LNT sięga roku 1946, kiedy genetyk amerykański Hermann Joseph Muller otrzymał nagrodę Nobla za *odkrycie, że mutacje mogą być indukowane przez promienie X*. Nagroda była zwieńczeniem prowadzonych w latach 20. XX w. badań, w których wykryto zmiany wyglądu muszek owocowych (*Drosophila melanogaster*) poddawanych działaniu promieni X w dawkach śmiertelnych dla człowieka. Zmiany te miały być skutkiem popromiennych mutacji, ale Muller nie był w stanie ich wykazać. W swoim noblowskim wykładzie badacz ten – ignorując odmienne wyniki uzyskiwane przez jego współpracowników – stwierdził, że nie istnieje próg dawki dla powstania

mutacji popromiennych, czyli że ich częstość rośnie wraz z dawką liniowo od zera. Było to tuż po wstrząsających skutkach wybuchów bomb atomowych w Hiroszynie i Nagasaki. W efekcie, kilka gremiów naukowych i regulacyjnych w USA – bezkrytycznie i/lub z motywów politycznych – przyjęło tezę Mullera i, już jako model LNT, zaleciło je jako podstawę przepisów ochrony przed promieniowaniem. Czy słusznie? Poniżej przedstawione wyniki, z konieczności tylko niektórych, badań epidemiologicznych i doświadczalnych dowodzą jednak, że hipoteza LNT nie ma podstaw naukowych.

I tak, szczegółowa analiza epidemiologiczna ok. 86 tys. ludzi, którzy przeżyli ataki jądrowe na miasta japońskie, wykazała, że jeśli dawki pochłoniętego promieniowania nie przekraczały 100-200 mGy¹, to liczba wykrytych białaczek i nowotworów litych była *mniej* niż wśród osób nienapromieniowanych. Także wśród ponad 75 tys. dzieci osób przebywających w Hiroszynie lub Nagasaki w dniach ataków atomowych (średnia dawka pochłonięta przez gonady rodziców wynosiła 264 mGy) śmiertelność z powodu nowotworów była *niż-*

*Lekarz – prof. dr hab. nauk med., pułkownik WP w stanie spoczynku, dyrektor Wojskowego Instytutu Higieny i Epidemiologii (2002–2007), wieloletni kierownik Zakładu Radiobiologii i Ochrony Radiacyjnej WIHE (1997–2020)
ORCID: 0000-0002-3822-7986

1. w przypadku p.j. jednostką dawki pochłoniętej jest grej (Gy), który odpowiada energii 1 dżula (J) przekazanej ośrodkowi o masie 1 kg, a więc 1 Gy = 1 J/kg. Dawki małe (niskie) p.j. to takie, które nie przekraczają 100 mGy (przy ekspozycji krótkotrwałej) ani 100 µGy/min (przy ekspozycji przewlekłej).

sza niż wśród potomstwa osób nie poddanych działaniu promieniowania atomowego.

W roku 2005 opublikowano statystykę zgonów ok. 2700 radiologów brytyjskich zarejestrowanych w zawodzie w latach 1897-1979, podzielonych na cztery grupy w zależności od wielkości obowiązujących w danym okresie dopuszczalnych limitów dawek promieniowania jonizującego. W porównaniu z innymi lekarzami, liczba zgonów radiologów z powodu nowotworów była we wszystkich grupach niższa niż przewidywana przy użyciu modelu LNT: największą różnicę wykryto dla okresu rejestracji przed rokiem 1920 (kiedy nie było limitu dawki dopuszczalnej dla radiologa), ale wyraźna niezgodność z liczbą spodziewanych zgonów dotyczyła także lat 1955-1979, gdy limit ten był zbliżony do dzisiejszego.

Ciekawy test poprawności hipotezy LNT przeprowadził Bernard Cohen, który śledził zachorowania na raka płuc wśród mieszkańców ponad 1600 hrabstw USA. Ludzie ci, tak jak wszyscy inni mieszkańcy Ziemi, wdychają naturalnie występujący w powietrzu radioaktywny gaz radon (Rn), uwalniany w trakcie rozpadu toru i uranu obecnych w glebie i skałach. Radon emituje silnie jonizujące cząstki α , które pochłaniane są przez nabłonek oskrzeli, co może indukować raka płuc. Cohen wykazał jednak, że jeśli stężenie Rn we wdychanym powietrzu nie przekraczało określonego poziomu, wówczas liczba zgonów na raka była tym *mniejsza* im *większe* było stężenie radonu. Wielokrotna analiza tych zaskakujących danych ciągle dawała dokładnie odwrotne wyniki niż przewiduje hipoteza LNT. Także Richard E. Thompson, w swej bardziej szczegółowej analizie stwierdził, że wśród kilkuset mieszkańców pewnego hrabstwa USA oddychających powietrzem zawierającym radon w stężeniu 25-250 Bq/m³ prawdopodobieństwo zachorowania na raka płuc jest *mniejsze* niż w grupie osób wdychających ten gaz w niższym stężeniu.

Hipotezy LNT nie potwierdzają też analizy prowadzone po katastrofie w Czarnobylu. Jak wykazuje Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR), do dziś z powodu zaburzeń popromiennych zmarło nie więcej niż 70 osób, w tym 47 w wyniku ostrej choroby popromiennej. Nie są więc prawdą ogłaszane w mediach dane o *setkach tysięcy ofiar Czarnobyla*. Wśród mieszkańców skażonych terenów Ukrainy, Białorusi i Rosji nie zanotowano zwiększonej zapadalności na nowotwory ani inne choroby popromienne; jedyny wyjątek stanowi rak tarczycy wykryty u osób, które w dniach katastrofy były dziećmi i wchłonęły duże ilości gromadzonego w tarczycy radioaktywnego jodu. Zachorowania te wykryto dzięki masowym badaniom przesiewowym, które ujawniły „nieme” postaci tego nowotworu. Taki rak na ogół nie jest groźny, a (jeśli to konieczne) jest skutecznie leczony, dlatego do dzisiaj zmarło nie więcej

niż dwudziestu spośród ok. 10 tys. mieszkańców skażonych terenów, u których rozwinął się ten nowotwór.

Niestety, analizy epidemiologiczne nie są w stanie udowodnić, że pochłanianie przez ludzi małych dawek p.j. nie tylko nie szkodzi, ale w wielu przypadkach działa prozdrowotnie (analiza tego dylematu epidemiologicznego wykracza poza ramy niniejszego artykułu). Trzeba więc odwołać się do wyników badań doświadczalnych. W roku 1987 na Uniwersytecie w Tokio wszczepiano myszom nowotwór dający przerzuty do płuc, po czym zwierzęta napromieniano w dawkach 100-500 mGy. Takie ekspozycje wyraźnie hamowały rozwój przerzutów nowotworowych. W roku 1993 na Uniwersytecie Medycznym Tohoku w mieście Sendai indukowano kolonie nowotworowe w płucach myszy przez dożylną wstrzykiwanie komórek raka. W okresie od 9 godzin przed do 3 godzin po podaniu tych komórek myszy napromieniano w dawkach 150-200 mGy, co hamowało rozwój kolonii nowotworowych. Te ostatnie wyniki powtórzyliśmy w Zakładzie Radiobiologii i Ochrony Radiacyjnej Wojskowego Instytutu Higieny i Epidemiologii, stosując inne komórki nowotworowe i inny szczep myszy: wielokrotne napromienianie w dawkach 100 lub 200 mGy wyraźnie blokowało rozwój kolonii nowotworowych w płucach. Ostatnio potwierdziliśmy te obserwacje wstrzykując komórki raka bezpośrednio do płuc myszy i pięciokrotnie napromieniając zwierzęta w dawkach 20 lub 200 mGy: w obu przypadkach, wzrost nowotworu był wyraźnie zahamowany.

Przeciwnotworowo działa także długotrwałe napromienianie w małych dawkach. Jeśli myszy, u których w 90% indukowano w grasicy rozwój złośliwego chłoniaka (za pomocą czterokrotnej ekspozycji na promieniowanie X w dawce 1,8 Gy) napromieniano wcześniej bez przerwy przez 450 dni promieniami gamma o niskiej mocy, nowotwór wykrywano tylko u 43% zwierząt, a gdy przez 258-450 dni stosowano wyłącznie ciągłą ekspozycję, u żadnej myszy chłoniak nie rozwijał się. Podobnie, jeśli myszy podatne na rozwój ciężkich chorób autoagresywnych były przez 5 tygodni ekspozowane na p.j. o niskiej mocy dawki, zwierzęta żyły niemal 4-krotnie dłużej dzięki zahamowaniu rozwoju tych chorób.

Na długo przed pojawieniem się danych o przeciwnotworowym działaniu małych dawek promieniowania X i γ lekarze w Europie i USA zaczęli stosować takie ekspozycje w leczeniu ludzi. W latach 1920-2020 opisano ponad 50 kontrolowanych prób klinicznych napromieniania całego ciała lub tylko tułowia ok. 2000 chorych z chłoniakami i białaczkami, ale także z różnymi guzami litymi. W większości przypadków pełne remisje choroby uzyskiwano u ponad połowy, a czasem u ponad 90% pacjentów. W odróżnieniu od chemioterapii, napromienianie całego ciała było nietoksyczne i szybciej hamo-

wało rozwój choroby. Niestety, wynikające z hipotezy LNT przepisy ochrony radiologicznej oraz powszechna radiofobia (obejmująca także wielu lekarzy) ciągle utrudniają prowadzenie wykorzystujących współczesne kryteria prób klinicznych ekspozycji całego ciała na promieniowanie X lub γ , co mogłoby doprowadzić do uznania takiej formy radioterapii za standardową metodę leczenia nowotworów i innych poważnych chorób.

Zacytowane wyżej i ciągle pojawiające się wyniki badań pokazują, że różnice w działaniu dużych i małych dawek p.j. mają nie tylko charakter ilościowy, ale także jakościowy, co obserwowane jest na wszystkich poziomach organizacji organizmu: molekularnym, komórkowym, tkankowym i ogólnoustrojowym. Mamy tu więc do czynienia ze zjawiskiem tzw. hormezy radiacyjnej (*hormáein* w antycznej grece znaczyło *wprawiać w ruch*), czyli pobudzania funkcji komórek i tkanek przez niskie dawki p.j., natomiast hamowania tych funkcji przez dawki wysokie. Hormezę odkryto w końcu XIX wieku, ale nadal wiele osób myli ją z pseudonaukowym systemem medycyny niekonwencjonalnej – homeopatią. W efekcie, nawet niektórzy naukowcy mają problem z wytłumaczeniem pozytywnych skutków zdrowotnych przyjmowania małych dawek p.j. W dużej mierze wynika to z faktu, że hormeza radiacyjna pozostaje w konflikcie z hipotezą LNT.

Co sprawia, że pomimo istnienia tak wielu danych podważających zasadność modelu LNT, ciągle stanowi on podstawę regulacji w ochronie radiologicznej? Istotną rolę odegrał tu autorytet noblisty Hermanna J. Mullera, którego poglądy przejęły bezkrytycznie niektóre amerykańskie ciała opiniotwórcze i regulacyjne. Ponadto, skoro dylemat epidemiologiczny nie pozwala jednoznacznie wykazać braku szkodliwości ekspozycji na małe dawki, odwołano się do zasady ostrożności, która (choć nieracjonalna i nienaukowa) w ochronie radiologicznej funkcjonuje jako tzw. reguła ALARA (*as low as reasonably achievable*). Mówi ona, że: po uwzględnieniu czynników medycznych, ekonomicznych i technicznych dawka aplikowanego p.j. powinna być jak najniższa. W efekcie, świadomie pozbawiamy się wielu korzystnych skutków ekspozycji na niskie dawki p.j.

Dominacja ideologii LNT ma brzemienne skutki. Najważniejsze z nich to:

a) ograniczenie stosowania źródeł p.j. w diagnostyce medycznej i badaniach naukowych;

b) generacja, zamiast zapobiegania powstawaniu, ofiar wśród ludzi ewakuowanych z terenów skażonych po awariach jądrowych;

c) skuteczność różnych tzw. ekologów, branży paliw kopalnych i OZE, lobby administracyjnego w dziedzinie ochrony radiologicznej itd. w torpedowaniu rozwoju najwydajniejszego i najbezpieczniejszego źródła energii, jakim są elektrownie jądrowe oraz, co należy podkreślić,

d) uniemożliwienie stosowania ekspozycji całego ciała na małe dawki p.j. jako lepszej od chemioterapii metody leczenia uogólnionych nowotworów i innych chorób.

Pora więc, aby porzucić fałszywą i szkodliwą hipotezę LNT (która więzi nas w przeszłości) na rzecz modelu progowego lub hormetycznego wykorzystujących współczesną wiedzę o działaniu małych dawek p.j.². W tym kontekście, warto przytoczyć słowa Charlesa L. Sandersa z jego książki *Radiobiologia i hormezy radiacyjna* opublikowanej w roku 2017: *Liczba ludzi, których życie może być rocznie uratowane i wydłużone przez [stosowanie] niskich dawek promieniowania jonizującego jest znacznie większa, niż łączna liczba Amerykanów poległych w wojnach w całej naszej historii.*

Literatura

- Brant A, Ulsh BA, Calabrese EJ. Time for Radiation Regulation to Evolve. The Cato Institute's magazine, Regulation, Fall 2019.
- Calabrese EJ, Baldwin LA. Radiation hormesis: the demise of a legitimate hypothesis. Hum Exp Toxicol. 19(1):76-84, 2000. doi: 10.1191/096032700678815611.
- Calabrese EJ. On the origins of the linear no-threshold (LNT) dogma by means of untruths, artful dodges and blind faith. Environ. Res. 142: 432 – 442, 2015.
- Calabrese EJ. Ethical failings: The problematic history of cancer risk assessment. Environ Res 193: 110582, 2021. doi: 10.1016/j.envres.2020.110582.
- Cardarelli JJ II, 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.
- Cheda A, Wrembel-Wargocka J, Lisiak E, Nowosielska EM, Marciniak M, Janiak MK. Single low doses of X-Rays inhibit the development of experimental tumor metastases and trigger the activities of NK cells in mice. Radiat. Res. 161: 335-340, 2004. doi: 10.1667/rr3123.
- Cohen BL. Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. Health Phys. 68(2): 157-174, 1995. doi: 10.1097/00004032-199502000-00002.
- Cohen BL. Test of the linear-no threshold theory: rationale for procedures. Dose Response 3(3):369-390, 2006. doi: 10.2203/dose-response.003.03.007.
- Dobrzyński L, Janiak MK, Strupczewski A, Waligórski M. O konieczności zmiany paradygmatu ochrony radiologicznej – komentarz SARI – Stowarzyszenia Uczonych dla Rzetelnej Informacji o Promieniowaniu. Scientists

2. Brant A. Ulsh i Edward J. Calabrese "Time for radiation regulation to evolve" *Regulation*, 2019.

- for Accurate Radiation Information, On the need to replace the present paradigm of radiation protection – comments by SARI (Scientists for Accurate Radiation Information). *Postech Jadr.* 60(3): 2-11, 2017.
- Doll R. Mortality of British Radiologists: A Lecture Note. *J. Radiat. Res.*, 46: 123-129, 2005.
- Doss M. Evidence supporting radiation hormesis in atomic bomb survivor cancer mortality data. *Dose Response* 10(4): 584-592, 2012. doi: 10.2203/dose-response.12-023.Doss.
- Golden R, J 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.
- 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): 1316-23, 2015. doi: 10.1016/S1470-2045(15)00209-0.
- Hansen CL, Hingorani R. LNT RIP: It is time to bury the linear no threshold hypothesis. *J Nucl Cardiol.* 26(4): 1358-1360, 2019. doi: 10.1007/s12350-019-01646-7.
- Hosoi Y, Sakamoto K. Suppressive effect of low dose total body irradiation on lung metastasis: dose dependency and effective period. *Radiation Oncol.* 26(2): 177-179, 1993. doi: 10.1016/0167-8140(93)90101-d.
- Ina Y, Sakai K. Further study of prolongation of life span associated with immunological modification by chronic low-dose-rate irradiation in MRL-lpr/lpr mice: effects of whole-life irradiation. *Radiat Res.* 163(4): 418-423, 2005. doi: 10.1667/rr3316.
- Ina Y, Tanooka H, Yamada T, Sakai K. Suppression of thymic lymphoma induction by life-long low-dose-rate irradiation accompanied by immune activation in C57BL/6 mice. *Radiat Res.* 163(2): 153-158, 2005. doi: 10.1667/rr3289.
- Janiak MK, Pocięgiel M, Welsh JS. Time to rejuvenate ultra-low dose whole-body radio-therapy of cancer. *Crit Rev Oncol Hematol.* 160: 103286, 2021. doi: 10.1016/j.critrevonc. 2021.103286.
- Jaworowski Z. Observations on the Chernobyl Disaster and LNT. *Dose Response* 8(2): 148-71, 2010a. doi: 10.2203/dose-response.09-029.Jaworowski.
- Jaworowski Z. Radiation hormesis – a remedy for fear. *Hum Exp Toxicol.* 29(4): 263-270, 2010b. doi: 10.1177/0960327110363974.
- Kaminski CY, Dattoli M, Kaminski JM. Replacing LNT: The Integrated LNT-Hormesis Model. *Dose Response* 8(2): 1559325820913788, 2020. doi: 10.1177/1559325820913788.
- Lorenz E, Hollcroft WJ, Miller E, Congdon CC, Schweisthal R. Long-term effects of acute and chronic irradiation in mice. I. Survival and tumor incidence following chronic irradiation of 0.11 r per day. *J Natl Cancer Inst.* 15(4): 1049 – 1058, 1955.
- Luckey TD. Radiation hormesis: The good, the bad, and the ugly. *Dose Response* 4(3): 169 – 190, 2006. doi: 10.2203/dose-response.06-102.luckey
- Luckey TD. Atomic bomb health benefits. *Dose-Response*, 6: 369 – 382, 2008. doi: 10.2203/dose-response.08-009.Luckey.
- Muller HJ. Artificial transmutation of the gene. *Science* 66(1699): 84 – 87, 1927.
- Nowosielska EM, Cheda A, Wrembel-Wargocka J, Janiak MK. Anti-neoplastic and immunostimulatory effects of low-dose X-ray fractions in mice. *Int. J. Radiat. Biol.* 87(2): 202-212, 2011. doi: 10.3109/09553002.2010.519422.
- Nowosielska EM, Cheda A, Pocięgiel M, Cheda L, Szymański P, Antoni Wiedlocha A.
- Effects of a unique combination of the whole-body low dose radiotherapy with inactivation of two immune checkpoints and/or a heat shock protein on the transplantable lung cancer in Mice. *Int. J. Mol. Sci.* 22(12): 6309, 2021. doi: 10.3390/ijms22126309.
- Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, Sakata R, Sugiyama H, Kodama K. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14, 1950 – 2003: An overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res.* 177(3): 229 – 243, 2012. doi: 10.1667/rr2629.1.
- Sanders CL. *Radiobiology and Radiation Hormesis. New Evidence and its Implications for Medicine and Society.* Springer-Verlag GmbH, 2017. ISBN: 3319563718
- Sutou S. Low-dose radiation from A-bombs elongated lifespan and reduced cancer mortality relative to un-irradiated individuals. *Genes Environ.* 40: 26, 2018. doi: 10.1186/s41021-018-0114-3.
- Suzuki N, Mizukoshi T. Effect of low doses of whole body irradiation on spontaneous lung metastasis of NFSa2ALM1 mouse tumors. *Radiat Med.* 5(6): 212-214. 1987.
- Takahashi A, Ohnishi T. Molecular mechanisms involved in adaptive responses to radiation, UV light, and heat. *J Radiat Res.* 50(5): 385-393, 2009. doi: 10.1269/jrr.09048s. Epub 2009 Jun 13.
- Thompson RE, Nelson DF, Popkin JH, Popkin Z. Case-control study of lung cancer risk from residential radon exposure in Worcester county, Massachusetts. *Health Phys.* 94(3): 228-241, 2008. doi: 10.1097/01.HP.0000288561.53790.5f.
- UNSCEAR 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II: Effects. United Nations Scientific Commit-

- tee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Annex J. United Nations sales publication E.00.IX.4. United Nations, New York, 2000.
- UNSCEAR 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II: Effects: Scientific Annexes C, D and E. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annex D. United Nations sales publication E.00.IX.4. United Nations, New York, 2011.
- UNSCEAR 2012. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly and Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2012 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annex A. United Nations sales publication E.00.IX.4. United Nations, New York, 2015.