

Choć brzmi to nieprawdopodobnie – małe dawki promieniowania jonizującego nie tylko nie szkodzą zdrowiu, ale wręcz pomagają.

Odkąd Wilhem K. Roentgen 28 grudnia 1895 roku ogłosił swoją pracę o niewidzialnych promieniach X, a dwa miesiące później Antoine Henri Becquerel doniósł o równie tajemniczych i przenikliwych „promieniach uranowych”, opinie o promieniowaniu jonizującym oscylowały między bezkrytycznym uwielbieniem i całkowitym odrzuceniem. Dzisiaj, z perspektywy stu lat wydaje się, że odkrycie nowego promieniowania i zjawiska radioaktywności, które otworzyło nieograniczone źródła energii, miało podobne znaczenie dla ludzkości jak opanowanie ognia 500 000 lat temu. Technologia ta uczyniła człowieka najbardziej rozpowszechnionym gatunkiem i umożliwiła ekspansję życia poza biosferę Ziemi. Nasi przodkowie adaptowali się do niej przez długie tysiące lat, a na opanowanie promieniowania jonizującego i energii jądrowej mieliśmy dotąd tylko jeden wiek. Przez te sto lat zdobyliśmy więcej wiedzy niż ludzkość przez całą swą dotychczasową historię, zajrzeliśmy w głąb atomu, w bezmiar kosmosu, w mechanizm życia i to wywołało w społecznej świadomości poczucie zagubienia i niepokój, jak spojrzanie w czeluść bez dna. Na pełną adaptację emocjonalną i kulturową tej wiedzy i na oswojenie się z niewidzialnymi promieniami oraz nowym źródłem energii jeden wiek okazał się czasem zbyt krótkim.

Najpierw było więc zdumienie i zaciekawienie badaczy, które wywoływała fotografia rentgenowska dłoni żony profesora Roentgena, z cieniem pięknego pierścienia na tle ostro zarysowanej struktury kości, opublikowana w „Nature” w styczniu 1896 roku (patrz: Roentgen i jego promienie X, „WiŻ” nr 12/1995).

Pierwszy strach pojawił się zaledwie sześć miesięcy po odkryciu promieni Roentgena, gdy ukazała się w „Niemieckim Tygodniku Lekarskim” informacja o uszkodzeniach popromiennych u ludzi - pierwszą ofiarą był niemiecki inżynier. Dwa lata później, w roku 1898, dobroczynne skutki małych dawek promieniowania u roślin zauważył G. F. Atkinson. Potem znów zapanował strach, gdy Becquerel dostrzegł w 1901 roku na swej piersi oparzenie skóry od noszonej przez kilka dni w kieszeni kamizelki fiołki z radem, pożyczonej od Marii Skłodowskiej-Curie. Ostrzegł wtedy Marię, by trzymała swą czteroletnią córeczkę Irenę z dala od radu, którego w otoczeniu państwa Curie było pełno (każdy współczesny inspektor ochrony radiologicznej kazałby natychmiast zamknąć laboratorium, a ich samych odkazić).

Piotr Curie natychmiast zbadał to eksperymentalnie. Przez 10 godzin trzymał przywiązany bandażem do swego ramienia preparat radowy. Wywołało to silne oparzenie z ogniskiem głębokiej martwicy. Pierwsi badacze i użytkownicy promieniowania jonizującego i radioaktywności dobrowolnie narażali się na napromienienie dużymi dawkami całego ciała. Doprowadziło to do śmierci 336 osób (m. in. Marii Skłodowskiej-Curie), głównie na nowotwory skóry i choroby krwi, uwiecznionych w Księżdzę chwały rentgenologów i radiologów wszystkich narodów wydanej w Monachium w 1959 roku. Te nieszczęśliwe przypadki uświadomiły wszystkim konieczność ochrony przed dużymi dawkami promieniowania.

Powszechny zachwyt wzbudziło odkrycie w 1902 roku przez Piotra Curie, we współpracy z dwoma lekarzami Bonchardem i Balthazardem, że promienie radu skutecznie leczą nowotwory. W następnych latach zapanował szalony entuzjazm, gdy uznano, że rad i jego promieniowanie jest dobry niemal na wszystko: długowieczność, potencję, reumatyzm, podagrę, neuralgię itd. Rad uznano za cudowną uzdrowicielską substancję, która doprowadzi do odkrycia „istoty życia” i stworzenia raju dla całej ludzkości. Panie nosiły gorsety zawierające rad, miliony ludzi poddawało się kuracji radiacyjnej w uzdrowiskach bogatych w „radoczynne” wody, a uczeni opisywali w licznych publikacjach pozytywne wyniki kuracji. Zamiast jeździć do wód można było taniej kurować się w domu różnymi preparatami radowymi.

W samych Stanach Zjednoczonych sprzedano około 500 000 buteleczek z „eliksirem Baileya” zawierających po około 80 000 Bq  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  w 30 mililitrach wody destylowanej. Multimilioner Eben Byers wypijał codziennie po kilka buteleczek (w latach 1928-1931) i zgromadził w swym ciele 370 000 000 Bq  $^{226}\text{Ra}$  (patrz: Wielki skandal w radioterapii, „Świat Nauki” nr 10/1993). Inni jednak byli rozsądniejsi i pili niewielką ilość eliksiru, lub jeździli do „wód” i wdychali przesycone radonem powietrze w grotach i sztolniach. Ten entuzjazm trwał na świecie aż do drugiej wojny światowej, mimo że Eben Byers zmarł na raka szczęki w 1932 roku. Ale dziesiątki lat badań nie wykryły nowotworów popromiennych u ludzi, którzy spożyli setki razy mniejsze niż Byers dawki radu, gromadząc mniej niż 2 000 000 Bq tego pierwiastka w swoim ciele. Jeszcze na początku lat pięćdziesiątych, pracując jako początkujący radioterapeuta w Instytucie Onkologii w Gliwicach, widziałem w piwnicach ślady tego entuzjazmu – dziwne aparaty ongiś powszechnego użytku, puchary zawierające zmyślnie

ukryte źródło radu do nasycania wody radonem (dziś są one oddawane do składowisk odpadów promieniotwórczych).

W latach przedwojennych wprowadzono koncepcję progów po stwierdzeniu, że negatywne skutki promieniowania występują tylko powyżej pewnego poziomu dawki. Już wtedy zgromadzono wiele danych eksperymentalnych wskazujących na dobroczynne działanie małych dawek. Rad i promieniowanie jonizujące zostały słusznie uznane za dobrodziejstwo ludzkości, nie tylko gdy stosowano je w dużych dawkach do leczenia nowotworów, ale i w dawkach małych, używanych w diagnostyce rentgenowskiej i balneologii. Nagle, po roku 1945, wszystko się zmieniło. Jak za dotknięciem czarodziejskiej różdżki dobroczynne działanie radu i promieniowania zniknęło z łamów prasy i większości publikacji naukowych (ale nie z praktyki), a pozostało tylko działanie niszczące żywą tkankę, m.in. nowotworową.

Myślę, że przyczyną tej nagłej zmiany była przede wszystkim broń jądrowa, która stała się potężnym czynnikiem odstraszenia i kamieniem filozoficznym polityki globalnej. Ci, którzy ją posiadli, starali się nadać jej możliwie najbardziej odstrasżające cechy, a cóż lepiej działało na wyobraźnię ludzi niż tajemnicze, niewidzialne promieniowanie, emitowane w śmiertelnych dawkach z powybuchowych skażeń radioaktywnych, pokrywających tysiące kilometrów kwadratowych i rzekomo szkodliwe nawet w najmniejszych ilościach. Uparcie powtarzane stwierdzenia, że promieniowanie z broni jądrowej może spowodować całkowitą zagładę ludzkości i eksterminację życia na Ziemi świetnie nadawały się do tego celu. Taką politykę informacyjną – straszenie publiczności - media kochają najbardziej i nie trzeba było żadnej specjalnej zachęty do jej masowego uprawiania. Przez 50 lat żyliśmy w cieniu atomowej grozy wiszącej nad światem. Każdy myślący człowiek miał tę świadomość, odczuwając sprzeciw i odrazę do zbrodniczej broni i potępiając jej twórców. Przypuszczam, że to było jednym ze źródeł powszechnego pesymizmu intelektualistów, niesłusznej utraty autorytetu nauki, odrzucania cywilizacji i zastępowania jej dekonstrukcjonizmem czy nazywania ludzkości i samego intelektu rakiem lub chorobą biosfery, antroponemią.

Lęk przed wielkimi dawkami promieniowania, takimi jakie pojawiłyby się w polu rażenia broni jądrowej, lub jakie otrzymali operatorzy zniszczonego reaktora czarnobylskiego, jest oczywiście słuszny. Natomiast powszechny strach przed małymi dawkami, takimi jakie ludzie w Polsce otrzymali od opadu czarnobylskiego jest równie nieuzasadniony jak obawa, że temperatura 20°C może nam zaszkodzić, ponieważ przy 200°C powstają oparzenia trzeciego stopnia.

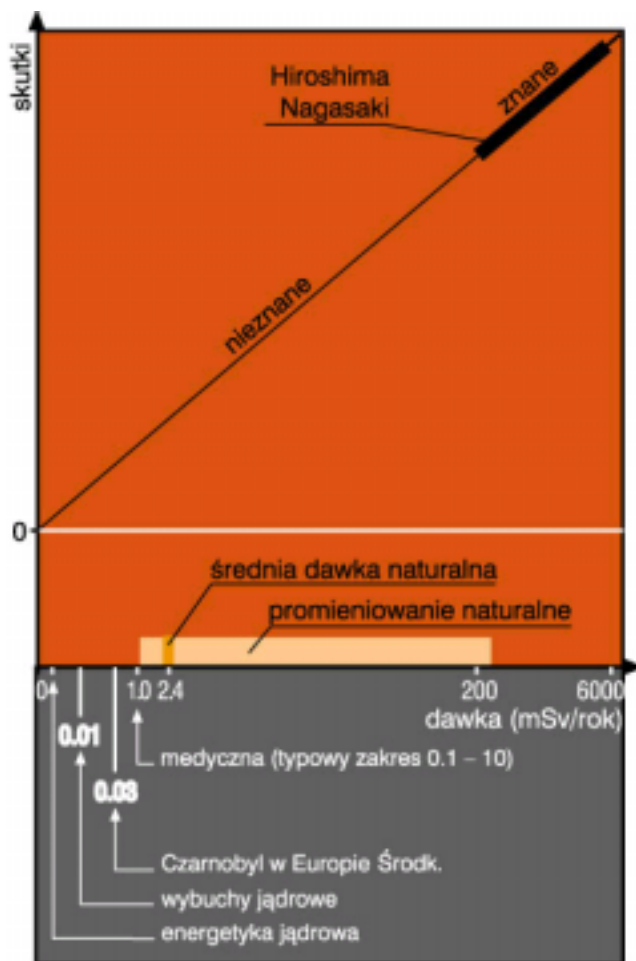
#### HIPOTEZA LINIOWA

Do rozpowszechnienia radiofobii, irracjonalnego lęku przed promieniowaniem, najbardziej przyczyniła się tzw. hipoteza liniowa. Zakłada ona, że te same skutki popromienne, tj. nowotwory lub choroby dziedziczne, po wielkich dawkach (np. 5 000 mSv) występują również po dawkach małych (np. 2,4 mSv od naturalnego tła promieniowania), a tylko częstość ich występowania jest mniejsza, proporcjonalnie do dawki (ryc. 1).

W hipotezie liniowej dokonuje się ekstrapolacji z rejonu wielkich dawek - skąd mamy godne zaufania dane epidemiologiczne – do nieznanego obszaru małych dawek. Zgodnie z hipotezą liniową zależność między dawką a skutkiem ma postać linii prostej i nawet najmniejsza dawka, bliska zerowej, zawsze przynosi szkodę. Hipoteza ta zakłada, że nie istnieje żaden próg, poniżej którego przestają występować skutki obserwowane po wielkich dawkach promieniowania. Uważa się przy tym, że skutki popromienne są wyłącznie szkodliwe (takie jak choćby skrócenie długości życia, powstawanie nowotworów złośliwych oraz uszkodzenia genetyczne), a małe dawki nie powodują żadnych nowych, innych niż szkodliwe efektów.

Hipoteza ta jest podstawą obecnej filozofii i polityki ochrony radiologicznej. Została ona arbitralnie przyjęta w roku 1959 przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP), aby ochronić osoby narażone zawodowo na promieniowanie jonizujące. Z biegiem lat to robocze założenie zaczęto uważać za fakt naukowy. Jednak hipoteza bezprogowego oddziaływania promieniowania pozostaje nadal jedynie quasi-administracyjnym założeniem, a tym samym nie jest udowodniona naukowo.

Ryc. 1. Hipoteza liniowa ekstrapoluje wyniki badań epidemiologicznych ludności Hiroszimy i Nagasaki, napromienionej dużymi dawkami, do dawki zerowej.



Średnie dawki promieniowania od opadu czarnobylskiego w pierwszym roku po katastrofie oraz obecne dawki od wybuchów jądrowych, energetyki jądrowej, diagnostyki rentgenowskiej oraz promieniowania naturalnego wg UNSCEAR, 1988. Maksymalny zakres dawki naturalnej wg Sohrabi, 1990.

Hipotezę liniową oparto na badaniach epidemiologicznych 91 tys. osób które przeżyły atak jądrowy na Hiroszimę i Nagasaki i napromienione zostały wielkimi jednorazowymi dawkami sięgającymi 6 000 mSv. Wyniki tych badań wskazywały, że nowotwory powstają po dawkach jednorazowych setki i tysiące razy wyższych od naturalnej dawki promieniowania, której bez przerwy przez całe życie poddawane są wszystkie żywe organizmy. Dawka pochodzi od naturalnych radionuclidów zawartych w skałach, glebie i w naszym własnym ciele ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$  oraz inne radioizotopy z rodziny uranu i toru), a także od promieniowania kosmicznego. Średnio na mieszkańca Ziemi wynosi ona 2,4 mSv rocznie. Ale dane z Japonii, gdzie jednorazowe napromienienie ludności dokonano się w czasie wybuchów jądrowych trwających  $10^{-8}$  sekundy, wskazują, że po dawkach niższych od 200 mSv nie powstają żadne nowotwory. W innych populacjach, napromienianych w sposób ciągły przez wiele lat, nie stwierdzano podwyższonego występowania nowotworów nawet po dawkach wielokrotnie wyższych.

Jednym z pozanaukowych czynników, które przyczyniły się do powszechnego przyjęcia hipotezy liniowej, była ważna sprawa polityczna: aby wstrzymać próby jądrowe w atmosferze – w płonnej nadziei, że ukróci to szaleństwo wyścigu zbrojeń atomowych – należało poruszyć opinię publiczną. Posługując się bezprogową hipotezą liniową przewidywano, ile zaburzeń genetycznych przyniesie odległym pokoleniom długożyjący węgiel  $^{14}\text{C}$ , wprowadzany do atmosfery wskutek wybuchów jądrowych. Wyścigu w ten sposób nie wstrzymano, ale ostatnią bombę wodorową eksplodowano w powietrzu w 1980 roku na poligonie w północnych Chinach. Gdy więc sprawę wybuchów w atmosferze załatwiono 17 lat temu, może powinniśmy zapomnieć o czynnikach pozanaukowych i krytycznie przyjrzeć się zasadzie bezprogowej.

Logiczną konsekwencją administracyjnego założenia z 1959 roku było ograniczenie narażenia radiacyjnego poniżej poziomu dawek naturalnych, którym miliardy ludzi było poddawanych od niepamiętnych czasów: jeżeli każda dawka jest szkodliwa, to należy zmniejszyć również i te pochodzące od promieniowania tła, które zawdzięczamy Matce Naturze. Takie rozumowanie okazało się jednak nie do przyjęcia dla wielu naukowców związanych z ochroną radiologiczną.

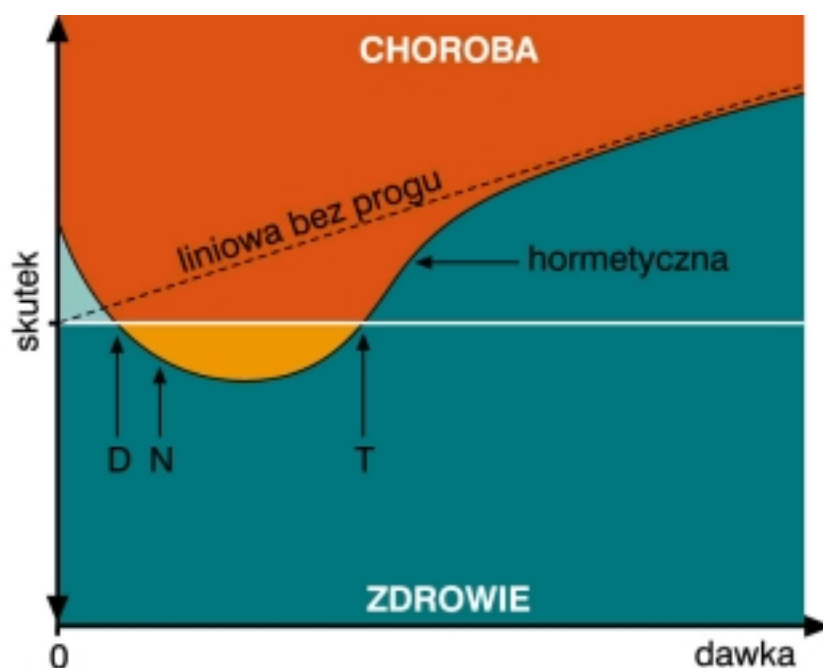
Absurdalność hipotezy liniowej ukazała się w pełnym świetle podczas katastrofy w Czarnobylu. Na jej podstawie wysiedlono na Białorusi, Ukrainie i w Rosji około 400 tys. ludzi. Spowodowało to ogrom cierpień, masowe choroby psychosomatyczne i obniżenie długości życia wywołane stresem i pogorszeniem standardu życia oraz materialne straty idące w dziesiątki miliardów dolarów. Początkowo, w roku 1986, jako poziom dawki promieniowania od skażenia czarnobylskiego, przy którym rozpoczynano ewakuację, przyjęto 350 mSv w ciągu 70 lat życia, czyli około podwójnej średniej życiowej dawki naturalnej (168 mSv). Po wysiedleniu pierwszych 135 tys. osób w 1986 roku, pod naciskiem populistycznych polityków i ekologów w roku 1990 Rada Najwyższa ZSRR (wbrew zaleceniom najlepszych rosyjskich radiologów) obniżyła ten poziom do 150 mSv. Było to zgodne z zasadami postępowania w razie wielkich wypadków radiacyjnych, przedstawionymi przez ICRP w 1984 roku, które zalecały wysiedlenie już po dawce 50 mSv. Wedle bezprogowej hipotezy liniowej dawka 350 mSv odpowiada wzrostowi zgonów nowotworowych o 1,75%, 150 mSv o 0,75% a 50 mSv o 0,25%. Nikt jednak nigdy nie zaobserwował wzrostu liczby nowotworów po takich dawkach, otrzymanych w ciągu 70 lat życia.

Zachodzi również pytanie, dlaczego rządy różnych krajów nie wysiedlają ludności z rejonów, gdzie dawka życiowa promieniowania naturalnego przekracza 350 czy 150 mSv? Na przykład dlaczego nie ewakuuje się wszystkich mieszkańców Norwegii, gdzie średnia dawka życiowa wynosi 365 mSv (w niektórych województwach natomiast 1 500 mSv), lub z Finlandii, gdzie dawka ta sięga 525 mSv? Czy nie należałoby wyludnić części stanu Kerali w Indiach, gdzie dawka życiowa wynosi 2 000 mSv? A co z rejonami Iranu, gdzie poziom promieniowania naturalnego przekracza 3 000 mSv w ciągu 70 lat, a w mieście Ramsar grupa mieszkańców otrzymuje średnią naturalną dawkę życiową promieniowania wynoszącą 17 000 mSv. Mieszkańcy ci nie wykazują zwiększonej zachorowalności na nowotwory i inne dolegliwości, a niektórzy osiągnęli wiek 110 lat.

#### HORMEZA RADIACYJNA

Hipoteza liniowa jest całkowicie sprzeczna ze zjawiskiem hormezy, tj. z występowaniem skutków stymulujących lub ogólnie pożytecznych dla organizmu po małych dawkach czynnika, który jednocześnie jest szkodliwy w dużych dawkach (ryc. 2). Zjawisko to jest od dawna znane w farmakologii i nikogo nie dziwi, że na przykład witaminy, nieodzowne dożycia w małych dawkach, są truciznami w dużych dawkach. Wiedział o tym już Paracelsus (1493-1541), renesansowy lekarz i filozof, który wprowadził ogólną zasadę biologiczną: Co jest trucizną? Wszystko jest trucizną i nic nie jest trucizną. Tylko dawka czyni, że coś jest trucizną. W ciągu ubiegłych 40 lat zasadę tę ignorowano w ochronie radiologicznej, tak jak gdyby promieniowanie jonizujące było czymś wyjątkowym, nie podlegającym ogólnym prawom fizjologii. Jednak przez te lata zgromadzono wiele faktów naukowych świadczących, że zjawisko hormezy dotyczy również promieniowania. Fakty te były rodzajem tabu jako niezgodne z obowiązującym paradygmatem bezprogowej hipotezy liniowej.

Ryc. 2. Uogólniony model odpowiedzi biologicznej na czynniki chemiczne i fizyczne. Deficyt czynnika (dawka mniejsza od D) powoduje objawy niedoboru (kolor jasnoniebieski); małe dawki (pomiędzy D i T) poprawiają stan zdrowia (kolor jasnopomarańczowy); dawki wyższe od T powodują toksyczne i inne skutki szkodliwe. N oznacza średnią dawkę naturalną promieniowania jonizującego. Linią przerywaną i ciągłą przedstawiono, odpowiednio, liniową-bezprogową i hormetyczną zależność dawka-skutek.



Przełomem i jakby oficjalnym imprimatur dla samego istnienia zjawiska hormezy radiacyjnej stało się opublikowanie w roku 1994 (z inicjatywy delegacji polskiej) raportu Komitetu Naukowego Narodów Zjednoczonych ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR), w którym dokonano przeglądu najważniejszych prac z tej dziedziny, starając się wyjaśnić mechanizmy biologiczne hormezy. Komitet ten jest najwyższym autorytetem międzynarodowym w sprawach promieniowania jonizującego. Dlatego jego raport wywołał rzeczywistą rewolucję w ochronie radiologicznej, którą właśnie przeżywamy. Nastąpił zalew artykułów krytykujących hipotezę liniową oraz pojawiły się apele, aby w ochronie radiologicznej wykorzystać inną zasadę. Ferment ten ogarnął cały świat, ale najbardziej może ujawnił się w Stanach Zjednoczonych, gdzie w 1995 roku odbyło się kilka konferencji na ten temat, a amerykańskie Towarzystwo Fizyki Zdrowia wydało oficjalne oświadczenie odzeglunujące się od hipotezy liniowej i jej różnych pochodnych. Podobnie jest we Francji, gdzie Akademia Nauk opublikowała specjalny raport poświęcony tej sprawie i krytykujący nowe, niskie limity dawek oparte na hipotezie liniowej.

Jesteśmy jeszcze dalecy od pełnego zrozumienia mechanizmów hormezy radiacyjnej. Wielu badaczy skłania się obecnie do przypuszczenia, że głównym jej mechanizmem jest stymulacja małymi dawkami procesów naprawy DNA w komórkach, co w efekcie zmniejsza szansę powstania nowotworów. Innymi mechanizmami na poziomie systemów kontroli komórkowej są: synteza białek, aktywacja genów, produkcja białek stresowych, detoksykacja rodników, aktywacja receptorów błonowych, namnażanie splenocytów i stymulacja układu odpornościowego. Znacznie więcej informacji dają badania eksperymentalne i epidemiologiczne, potwierdzające samo istnienie dobroczynnego wpływu małych dawek promieniowania. Literatura naukowa dotycząca tego zjawiska liczy obecnie około 1300 publikacji.

#### BADANIA DOŚWIADCZALNE

W 1943 roku, we wczesnym stadium Projektu Manhattan – amerykańskiego programu konstrukcji bomby atomowej – stwierdzono, że zwierzęta doświadczalne, które wdychały pył uranu w stężeniach mających prowadzić do śmierci, żyły dłużej, wyglądały zdrowiej i miały więcej potomstwa niż zwierzęta nie skażone. Obserwacje te latami uważano za anomalie, jednak późniejsze badania dały podobne wyniki. Również w pierwszym raporcie UNSCEAR dla Zgromadzenia Ogólnego Narodów Zjednoczonych, w roku 1958, znalazły się dane wskazujące na wyraźnie dłuższy czas przeżycia myszy i świnek morskich po małych dawkach promieniowania.

U ssaków małe dawki promieniowania zwiększają reakcje obronne przeciw chorobom nowotworowym i zakaźnym, podwyższają długowieczność, poprawiają płodność i zwiększają wagę ciała. Na przykład u myszy po dawkach promieniowania gamma  $^{137}\text{Cs}$  od 0,25 do 2 Gy częstość białaczek, raków i mięsaków była niższa niż u nie napromienionych zwierząt kontrolnych. Liczba wszystkich nowotworów u zwierząt otrzymujących dawkę 1 Gy była około 30% niższa niż u nie napromienionych (tabela 1). W wielu doświadczeniach małe inicjujące dawki promieniowania poprawiały przeżywalność zwierząt poddawanych następnie napromienieniu dużymi dawkami, bliskimi śmiertelnym. W innych doświadczeniach stwierdzono przedłużenie życia zwierząt napromienionych dawkami od 250 do 3 000 mSv.

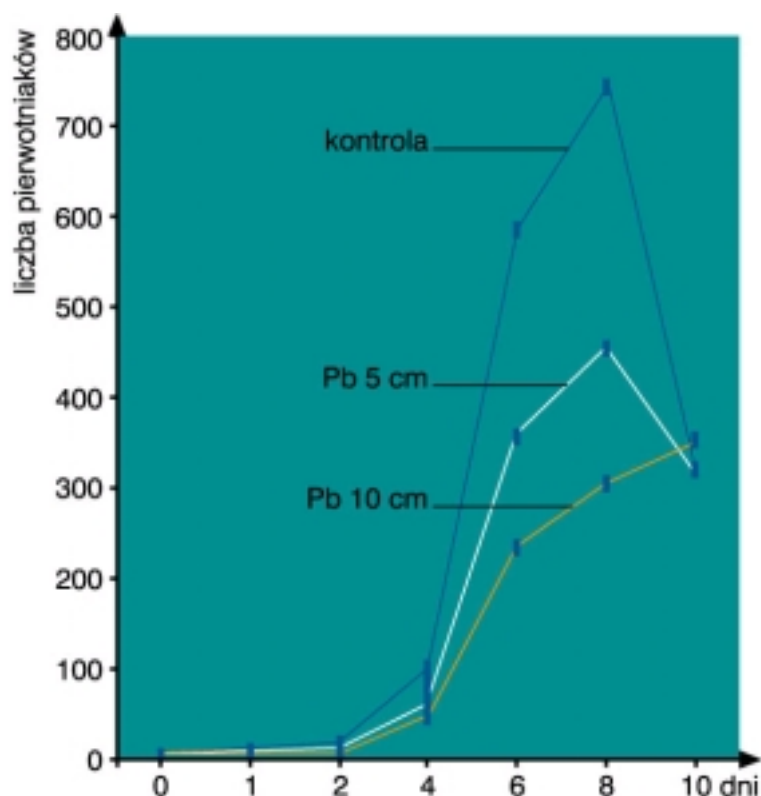
Tab. 1. Powstawanie nowotworów (w procentach) po jednorazowym napromienieniu trzymiesięcznych myszy promieniowaniem  $^{137}\text{Cs}$ . Według Maisin et al. (1988). W nawiasach podano powstawanie białaczek oczekiwane zgodnie z hipotezą liniową. Wyraźny efekt hormetyczny oznaczono tłustym drukiem.

| Dawka (Gy) | Białaczki            | Raki i mięsaki | Wszystkie nowotwory |
|------------|----------------------|----------------|---------------------|
| 0          | 20,93                | 16,30          | 33,19               |
| 0,25       | 18,18 (21,92)        | 14,04          | 28,51               |
| 0,5        | <b>15,48 (22,91)</b> | <b>8,79</b>    | <b>23,01</b>        |
| 1          | <b>15,04 (24,89)</b> | <b>8,94</b>    | <b>21,95</b>        |
| 2          | 13,82 (28,85)        | 14,29          | 26,27               |
| 4          | 26,57 (36,76)        | 16,08          | 39,16               |
| 6          | 44,68 (44,68)        | 14,36          | 55,32               |

Ciekawe wyniki przyniosły prace francuskich naukowców, zapoczątkowane w latach sześćdziesiątych. Wskazują one, że promieniowanie jonizujące może być niezbędne do życia. Badacze francuscy w licznych doświadczeniach stwierdzili, że u pierwotniaków i bakterii, hodowanych w warunkach sztucznie obniżonego poziomu promieniowania naturalnego, występują objawy niedoboru, wyrażane przez dramatyczne zmniejszenie rozmnażania (ryc. 3).



Ryc. 3. Obniżenie rozmnażania się pantofelków przy deficycie promieniowania. Rycina przedstawia wpływ zastosowania osłon ołowiowych na rozmnażanie się *Paramecium tetraurelia*, hodowanego w trzech identycznych komorach cieplarkowych. Dwie komory były osłonięte ołowiem: jedna warstwą o grubości 5 cm, a druga 10 cm. Nieosłonięte zwierzęta kontrolne były ekspozowane na promieniowanie naturalne odpowiadające dawce rocznej 1,75 mSv, a zwierzęta osłonięte 10 cm ołowiu na promieniowanie odpowiadające dawce rocznej 0,3 mSv. Ósmego dnia rozmnażanie się pierwotniaków osłoniętych 5 cm ołowiu było o 40% niższe od rozmnażania się orzęsków nie osłoniętych, a pierwotniaków osłoniętych 10 cm ołowiu o 60% niższe. Wg Panel et al., 1987.



Należało tego oczekiwać. Organizmy żywe rozwinęły się bowiem w warunkach stałej ekspozycji na promieniowanie jonizujące, które we wczesnych okresach geologicznych było wyższe niż obecnie. Niektórzy autorzy sądzą, że promieniowanie to było potrzebne do samej inicjacji życia, dostarczając rodników do syntezy związków organicznych. Jednak aby przeżyć, pierwsze organizmy komórkowe musiały 3,5 mld lat temu rozwinąć mechanizmy obronne przeciw szkodliwym skutkom promieniowania jonizującego. Prawdopodobnie już w tym wczesnym okresie zaczęły wykorzystywać radiację dla swego dobra. Podobnie, ale dopiero 500 mln lat po powstaniu organizmów komórkowych, zielone glony wyposażone w chlorofil nauczyły się wykorzystywać znacznie groźniejsze promieniowanie ultrafioletowe w procesie fotosyntezy, która stała się podwaliną życia większości współczesnych organizmów.

To, że organizmy wyższe nie wykształciły organów czucia promieniowania jonizującego, wynika prawdopodobnie z faktu, iż jest ono znacznie mniej niebezpieczne niż inne czynniki fizyczne i chemiczne występujące w biosferze, a mechanizmy obronne obejmują z nadmiarem naturalny zakres dawek tego promieniowania. Ten zakres dawek (1-200 mSv/rok) jest znacznie większy niż zakres normalnej ekspozycji na energię cieplną, wahający się w zakresie zaledwie około 50°C. Nawet tylko pięciokrotne podwyższenie normalnej temperatury wody w wannie z 20°C do 100°C może doprowadzić do śmierci. W przypadku ołowiu zaledwie trzykrotne podwyższenie jego normalnego stężenia w krwi daje ostre objawy toksyczne. Natomiast śmiertelna jednorazowa (podana np. w ciągu godziny) dawka promieniowania jonizującego, około 3000-5000 mSv, jest ponad 1000 razy wyższa od średniej rocznej dawki naturalnej (2,4 mSv/rok). Dawka śmiertelna promieniowania rozłożonego równomiernie w długim czasie jest znacznie wyższa. Mechanizmy obronne wypracowane w ciągu ewolucji zapewniają współczesnym organizmom ogromny zapas bezpieczeństwa wobec poziomów promieniowania występujących w środowisku naturalnym i nie awaryjnych emisji ze sztucznych źródeł stworzonych przez człowieka.

#### ŚWIADECTWA EPIDEMIOLOGICZNE

Najciekawsze są wyniki badań populacji ludzkiej. Informacje epidemiologiczne o dobroczynnym wpływie promieniowania pochodzą z badań ludności japońskiej, która przeżyła atak jądrowy, ludności rejonów o wysokim „tle” naturalnego promieniowania gamma oraz o wysokim stężeniu radonu w mieszkaniach, z badań ludzi poddanych napromienieniu medycznemu, pracowników przemysłu jądrowego oraz mieszkańców silnie skażonych rejonów na Uralu. Wpływ paradygmatu bezprogowego był tak wielki, że oczywiste skutki

hormetyczne widoczne w dawniejszych badaniach epidemiologicznych były nie zauważane przez samych autorów (tabela 2).

Tab. 2. Zgony na raka piersi wśród 31 710 kobiet kanadyjskich chorych na gruźlicę, napromienionych w czasie prześwietleń rentgenowskich. Efekt hormetyczny wyraźnie widoczny w zakresie dawek 100-190 mGy nie został zauważony przez autorów, którzy stwierdzili, że „Dane były najbardziej zgodne z liniową zależnością między dawką a skutkiem”. Wg Miller et al., 1989.

| Dawka (mGy)   | Zgony na 10 <sup>3</sup> osobolat |
|---------------|-----------------------------------|
| 0 - 90        | 579                               |
| 100 - 190     | 422                               |
| 200 - 290     | 562                               |
| 300 - 390     | 651                               |
| 400 - 490     | 611                               |
| 700 - 990     | 1362                              |
| 1000 - 2900   | 1382                              |
| 3000 - 5990   | 2334                              |
| 6000 - 10 000 | 8000                              |
| >10 000       | 20 620                            |

### Po katastrofie w Czarnobylu wiele białoruskich wsi niepotrzebnie wysiedlono

Grzech selektywnego dobierania danych do panującego paradygmatu widoczny jest nawet w wielkich opracowaniach komitetów naukowych. Na przykład w liczącym 421 stron raporcie Amerykańskiej Akademii Nauk z 1990 roku na temat skutków niskich dawek promieniowania jonizującego, zwanym w skrócie BEIR V, przedstawiona jest liczba białaczek, jakie powstały po przeprowadzonym w 1957 roku próbnym wybuchu jądrowym SMOKY wśród 3 224 uczestników eksperymentu. Otrzymali oni średnią dawkę promieniowania około 6 mSv, a tylko 1% dawkę większą niż 50 mSv. Przytoczone w raporcie BEIR V dane z pracy Caldwell'a i innych wskazują, że do roku 1977 zaobserwowano wśród tych osób 9 białaczek, podczas gdy w normalnej populacji tej samej wielkości należało oczekiwać 3,5 przypadku tej choroby. Raport określił to jako „znaczny wzrost zapadalności i śmiertelności białaczkowej”. Nie podano w nim jednak przykładu skutków innej serii prób jądrowych, zwanych „Operation Greenhouse”, opisanych w 1985 roku. Uczestnicy tej operacji otrzymali dawkę średnią około 13 mSv, a 3% przekroczyło 50 mSv. Wśród nich stwierdzono tylko jeden przypadek białaczki, podczas gdy w normalnej populacji tej samej wielkości występują średnio 4,43 przypadki. W podobny sposób raport Komitetu UNSCEAR z 1993 roku omawia dane z wybuchu SMOKY, nie wspominając o „Operacji Greenhouse”.

Autorzy raportu BEIR V popełnili jeszcze większy grzech. Cytują mianowicie badania epidemiologiczne dr. Larsa-Erika Holma i jego współpracowników, którzy przebadali ponad 35 tys. pacjentów szwedzkich, poddawanych diagnostyce wykorzystującej radioaktywny <sup>131</sup>I. Średnia dawka na tarczycę, jaką osoby te otrzymały od radioaktywnego jodu wynosiła około 500 mSv. Raport BEIR V stwierdza, że zaobserwowano wśród nich 50 nowotworów tarczycy, zamiast oczekiwanych w normalnej populacji 39,37 przypadków. Zatem stosunek obserwowanych do oczekiwanych zachorowań na raka wynosił 1,27. Tymczasem w pracy tej omawiane są dwie grupy pacjentów: tych, którzy byli badani w związku z klinicznym podejrzeniem raka tarczycy oraz osoby badane z innych przyczyn. Otóż powyższy stosunek 1,27 odnosi się do sumy obu tych grup. Natomiast w grupie nie podejrzanej o nowotwory, a więc zbliżonej do przeciętnej populacji, stosunek zachorowań obserwowanych do oczekiwanych wynosił 0,62, czyli o 38% mniej nowotworów niż w normalnej populacji.

W podobny sposób postąpił Komitet UNSCEAR w rozdziale „Epidemiological Studies of Radiation Carcinogenesis” swojego raportu dla Zgromadzenia Ogólnego ONZ z 1994 roku: o tym hormetycznym efekcie podania stosunkowo dużych aktywności <sup>131</sup>I nawet w nim nie wspomniano. UNSCEAR pomija go również w swoich poprzednich raportach z 1988 i 1993 omawiających nowotwory popromienne. Natomiast jest on szeroko opisany w drugim, „rewolucyjnym” rozdziale tego samego raportu, omawiającym hormezę: „Adaptive Responses to Radiation in Cells and Organisms”. Oddaje to trochę dramatyzm boję o hormezę, które przez 14 lat toczyły się na forum UNSCEAR. Wyniki badań z Hiroshimy i Nagasaki dotyczące chorób dziedzicznych wskazują, że jednorazowe napromienienie dawkami średniej wielkości nie pogorszyło zdrowia następnego pokolenia. Natomiast nieoczekiwanie ujawniły się pozytywne skutki genetyczne. Wśród dzieci rodziców, którzy przeżyli atak jądrowy stwierdzono o 4% mniejszą śmiertelność niż u dzieci rodziców nie narażonych na



promieniowanie bomb atomowych oraz 23% mniej zaburzeń liczby chromosomów, 29% mniej aberracji chromosomowych i 30% mniej mutacji białek krwi (tabela 3).

Tab. 3. Częstość skutków genetycznych (w procentach) u dzieci rodziców, którzy przeżyli ataki atomowe w Hiroszynie i Nagasaki i zostali napromienieni dawkami 400-600 mSv. Wg Yoshimoto et al., 1991; Awa et al., 1989; Neel et al., 1988.

| Skutek                        | Nie napromienieni   | Napromienieni       |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Zgony niemowląt 1946-1958     | 7,35                | 7,08                |
| Aberracje chromosomowe        | 0,31                | 0,22                |
| Zaburzenia liczby chromosomów | 0,30                | 0,23                |
| Mutacje białek krwi           | $6,4 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{-6}$ |

Podobnie nieoczekiwane wyniki znaleziono w jednym z najlepszych studiów dotyczących genetyki ludzkiej przeprowadzonych na Węgrzech przed i po katastrofie w Czarnobylu. Kilka typów ciężkich anomalii wrodzonych występowało na Węgrzech po katastrofie z częstością mniejszą niż przed katastrofą (tabela 4). Japońskie dane epidemiologiczne wskazują, że wśród kobiet, które przeżyły w Nagasaki atak atomowy i były napromienione małymi dawkami, ogólna śmiertelność jest w starszych grupach wieku około 40% niższa niż wśród osób nie napromienionych. Również ci, którzy otrzymali dawki większe od 10 mSv, wykazują śmiertelność mniejszą niż osoby napromienione dawką mniejszą niż 5 mSv (tabela 5). Jak wynika z ryc. 4 u ludzi z Hiroszimy oraz Nagasaki napromienionych małymi dawkami ryzyko śmierci z powodu białaczek było niższe niż u nie napromienionych mieszkańców tychże miast.

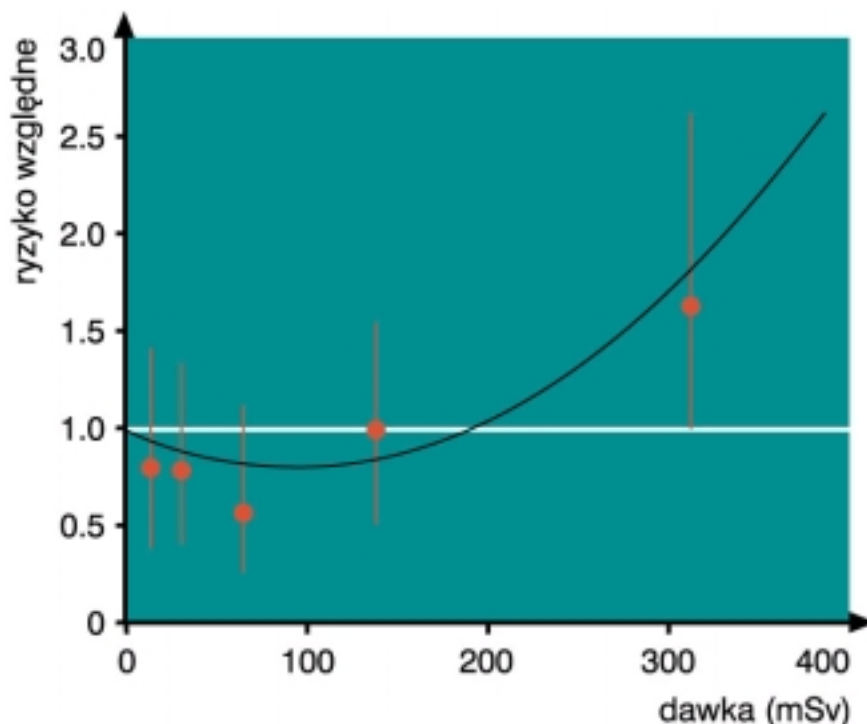
Tab. 4. Liczba zaburzeń rozwojowych dzieci (na 10 tys.) urodzonych na Węgrzech przed i po katastrofie w Czarnobylu. Średnia dawka od promieniowania czarnobylskiego wynosiła na Węgrzech w roku 1986 0,06-0,5 mSv na osobę (Feher, 1988). Wg Czeizel, 1989

| Zaburzenie rozwojowe | 1980-85 | 1.5.1986  | 1.5.1987  |
|----------------------|---------|-----------|-----------|
|                      |         | 30.4.1987 | 30.4.1988 |
| Zespół Downa         | 8,44    | 7,27      | 6,77      |
| Retinoblastoma       | 0,32    | 0,16      | 0,08      |
| Guz Wilmsa           | 0,80    | 0,47      | 0,56      |

Tab. 5. Roczna śmiertelność ogólna kobiet w Nagasaki (na 100 tys.) w latach 1970-1976. Wg Kondo, 1993.

| Wiek (lata) | Napromienione |        | Nie napromienione |
|-------------|---------------|--------|-------------------|
|             | >10mSv        | <5mSv  |                   |
| 30-39       | 78            | 87     | 103               |
| 40-49       | 218           | 224    | 223               |
| 50-59       | 428           | 569    | 510               |
| 60-69       | 833           | 1303   | 1 516             |
| 70-79       | 3 242         | 4 161  | 5 305             |
| >80         | 13 158        | 12 626 | 19 634            |

Ryc. 4. Ryzyko śmierci z powodu białaczek w Hiroszynie i Nagasaki w zakresie dawek niskich i średnich. Wg UNSCEAR, 1994. Białą linią oznaczono normalne ryzyko w nie napromienionej populacji tych miast.



Najszerzej zakrojone badania wpływu promieniowania naturalnego na człowieka przeprowadzono w Chinach. Zdrowie ludności w okręgu Yangjiang o wyższym poziomie naturalnej dawki radiacji (średnio około 5,5 mSv/rok, tj. 385 mSv/całe życie) porównano z mieszkańcami okręgów Enping i Taishan o niskiej dawce promieniowania (2,1 mSv/rok, tj. 147 mSv/całe życie). Naturalna dawka promieniowania w Yangjiang była nieco wyższa od poziomu, który został początkowo przyjęty dla ewakuacji z rejonu Czarnobyla (a 2,5 razy wyższa niż poziom przyjęty przez Radę Najwyższą ZSRR w 1990 r.). Czy może rząd chiński powinien pójść za przykładem radzieckim i wysiedlić okręg Yangjiang? Dane epidemiologiczne wskazują, że nie. W grupie 10-79 lat ogólna śmiertelność nowotworowa (bez białaczek) była o 14,6% niższa w okręgu o podwyższonym promieniowaniu niż w okręgach o niższej radiacji. Wśród mężczyzn śmiertelność z powodu białaczek była w okręgu Yangjiang o 15%, a wśród kobiet aż o 60% niższa niż w okręgach Enping i Taishan. Zbliżone wyniki uzyskano w rejonach o niskim i wysokim tle promieniowania naturalnego w Indiach, Stanach Zjednoczonych i we Francji.

**Zdaniem prof. Leonida Ilyina, odpowiedzialnego za ochronę radiologiczną w ZSRR, ze względów zdrowotnych należało przesiedlić około 4,5 tys. osób. Wysiedlono prawie 400 tys. osób.**

Obecnie w wielu krajach prowadzona jest akcja zmniejszania poziomu naturalnego  $^{222}\text{Rn}$  w domach. Ten radioaktywny gaz był przyczyną powstawania nowotworów płuc wśród górników w kopalniach uranu, gdzie stężenia radonu były wielokrotnie wyższe niż w domach mieszkalnych. Górnicy ci byli również narażeni na pył, metale ciężkie, spaliny silników Diesla itp. Ale za pomocą prostej arytmetyki i hipotezy liniowej dane epidemiologiczne z kopalń ekstrapolowano do sytuacji w domach i wyliczono, że z powodu radonu w mieszkaniach umiera corocznie na raka płuc około 10 tys. osób w samych Stanach Zjednoczonych. Tymczasem większość badań epidemiologicznych wskazuje, że rzadziej chorują na raka płuc mieszkańcy domów o wyższej niż przeciętnej koncentracji radonu. To samo stwierdzono w Stanach Zjednoczonych, Japonii, Chinach, Kanadzie, Szwecji, Danii, Finlandii, Francji i Wielkiej Brytanii.

Dobroczynne skutki promieniowania zaobserwowano również tam, gdzie spodziewano się ich najmniej: w wielkich zakładach przemysłu jądrowego. Badania epidemiologiczne w tego typu zakładach w Kanadzie, Wielkiej Brytanii, Japonii i Stanach Zjednoczonych wskazują, że wśród pracowników narażonych na małe dawki promieniowania śmiertelność z przyczyn nowotworowych była niższa niż wśród pracowników nie narażonych o 11-42%, a także niższa z przyczyn nowotworowych niż przeciętna krajowa.

Tab. 6. Umieralność na białaczki wśród 9997 mężczyzn zatrudnionych w Kanadyjskich Zakładach Energii Atomowej (AECL). „Rejestr.” oznacza zgony zarejestrowane w AECL; „Oczekiwane” oznacza zgony oczekiwane zgodnie z częstością występującą w ogólnej populacji Kanady. Wg Gribbin et al., 1992.

| Przyczyna zgonu       | Nie napromienieni |            | Napromienieni |            |
|-----------------------|-------------------|------------|---------------|------------|
|                       | Rejestr.          | Oczekiwane | Rejestr.      | Oczekiwane |
| Białaczka limfocytowa | 2                 | 0,85       | 0             | 2,40       |
| Białaczka szpikowa    | 2                 | 1,36       | 2             | 3,50       |
| Inne białaczki        | 1                 | 1,40       | 1             | 1,59       |

Tak na przykład na około 700 tys. pracowników stoczni amerykańskich, 108 tys. zatrudnionych było w stoczniach budujących jednostki o napędzie nuklearnym. Ci ostatni otrzymali dawki około 5 mSv. Śmiertelność z powodu wszystkich przyczyn była wśród robotników narażonych na promieniowanie około 24% mniejsza niż u stoczniovców nie napromienionych zawodowo, natomiast śmiertelność z powodu białaczek była w grupie silniej napromienionych (5 mSv) o 58% niższa. Te dziesięcioletnie badania, przeprowadzone przez G. M. Matanoskiego z Johns Hopkins University i zakończone w roku 1987, kosztowały 10 mln dolarów. Ale wyniki badań (w formie raportu liczącego 437 stron), o wysokiej pewności statystycznej, nigdy nie zostały opublikowane. Dopiero w roku 1991 amerykański Departament Energii opublikował je w formie dwustronicowej informacji dla prasy.

Wyniki te, oparte na badaniach największej grupy osób narażonych na promieniowanie (większej niż w Hiroszynie i Nagasaki) oraz na najdokładniejszych dotąd pomiarach radiacji, są prawdopodobnie najlepszym dowodem naukowym, że małe dawki promieniowania nie szkodzą zdrowiu. Wskazują one na istnienie progu występowania ujemnych skutków zdrowotnych promieniowania między dawką 200 a 2 000 mSv. Całe lata dane te były ignorowane i mogłem się z nimi zapoznać dopiero po ich przedstawieniu we wspomnianym wyżej raporcie Komitetu UNSCEAR z 1994 roku. Gdyby natomiast wyniki badań mówiły, że wśród pracowników amerykańskich stoczni nuklearnych zauważono nie 58% obniżenie zgonów na białaczkę, lecz jakkolwiek wzrost, huczałaby o tym cała prasa światowa. Najnowsze opublikowane badania z tej dziedziny pochodzą z byłego Związku Radzieckiego. We wrześniu 1957 roku, w wyniku eksplozji chemicznej w fabryce materiałów do bomb jądrowych, mieszkańcy 22 wiosek we wschodnim Uralu zostali napromienieni dawkami sięgającymi 1 500 mSv. Ewakuowano wtedy około 10 tys. osób, których losy śledzono przez następne 30 lat. Dopiero po upadku ZSRR opublikowano wyniki tych badań. Okazało się, że w grupie osób, które otrzymały średnią dawkę w wysokości 496 mSv, śmiertelność nowotworowa była o 28% niższa niż u nie napromienionej ludności tego samego rejonu, przy średniej dawce 129 mSv o 39% niższa, a przy dawce 40 mSv o 27%.

#### ETYKA I EKONOMIA HIPOTEZY LINIOWEJ

Dr Lauriston Taylor, były prezydent Narodowej Rady Pomiarów i Ochrony Radiologicznej Stanów Zjednoczonych, określił wykorzystywanie liniowej bezprogowej zależności dawka-skutek do obliczeń przewidywanej liczby poczynobylskich zgonów nowotworowych jako głęboko niemoralne wykorzystywanie naszego dziedzictwa naukowego. Mój dawny nauczyciel, nieżyjący już prof. W. V. Mayneord z Królewskiego Instytutu Rakowego w Londynie, jeden z najbardziej zasłużonych dla ochrony radiologicznej ludzi, członek ICRP i brytyjskiej delegacji w UNSCEAR, w swej książce *Radiation and Health* (Promieniowanie i zdrowie, 1964) określił to jednym słowem: nonsens.

#### **Byli mieszkańcy wysiedlonych wiosek spotykają się co roku na cmentarzach**

Jaka jest moralna odpowiedzialność ludzi donoszących o dziesiątkach tysięcy wymagowanych zgonów czarnobylskich, wyliczanych na podstawie hipotezy liniowej? Albo tych, którzy informują czytelników np. o 100 czarnobylskich zgonach dziennie i o stale rosnącej liczbie zachorowań na białaczkę („Dziennik Polski”, 8.02.1996). W rzeczywistości w wyniku katastrofy czarnobylskiej zmarło w ciągu dziesięciu lat 38 osób (tj. mniej niż ginie w Polsce w ciągu weekendu w wypadkach samochodowych) i brak jest jakiegokolwiek wzrostu zachorowań na białaczkę. Jaka jest odpowiedzialność prasy, która o Międzynarodowej Konferencji na temat Czarnobyla (Wiedeń, kwiecień 1996 roku – 845 uczestników plus 208 dziennikarzy), potwierdzającej te liczby, milczy lub pisze wielkimi literami: Bilans groźniejszy niż przypuszczano („Życie Warszawy”, 11.04.1996)? Relację z wykładu w Warszawie prof. L. Ilyina (dyrektora Instytutu Biofizyki w Moskwie, gdzie leczono ludzi napromienionych w Czarnobylu), na którym podał on powyższe prawdziwe liczby zgonów, opatrzone tytułem: Skutki awarii coraz bardziej tragiczne („Gazeta Poznańska”, 30.01.1996).

Czy jest etyczne, gdy gazety publikują zdjęcia, a telewizja przedstawia film z dziećmi z Kijowa bez włosów i ich rozpaczające matki, rzekome ofiary napromienienia czarnobylskiego? W rzeczywistości była to dobrze znana choroba, grzybica strzygąca powierzchniowa (*trichophytiasis superficialis*), pojawiająca się okresowo u dzieci w wieku szkolnym, żyjących w złych warunkach higienicznych i ulegająca samowyleczeniu w okresie pokwitania. Minimalna dawka promieniowania, po której wypadają włosy, wynosi ponad 1 000 mSv. Dawka otrzymywana w roku 1986 przez mieszkańców Kijowa sięgała od 4 do 7 mSv. Wielokrotnie również pokazywano jako ofiary Czarnobyla dzieci chore na białaczkę lub z zaburzeniami rozwojowymi oczu, kończyn czy podniebienia. Prowadzone na wielką skalę badania nie stwierdziły wzrostu tych schorzeń. Natomiast nie trudno znaleźć takie dzieci w każdym mieście wielkości Kijowa, gdyż normalna częstość występowania białaczek wynosi tam około 150 rocznie, a na przykład zaburzeń rozwojowych oczu lub warg zajęczych kilkaset.

W roku 1986, przyjmując bezprogową hipotezę liniową, Norwegowie zabili tysiące owiec i reniferów, a ich mięso zniszczyli w obawie przed skażeniem <sup>137</sup>Cs. Operacja ta kosztowała 60 mln dolarów i miała na celu zmniejszenie średniej dawki promieniowania czarnobylskiego o 0,1 mSv/rok. Stanowiło to około 2% naturalnej dawki promieniowania w Norwegii (5,2 mSv/rok). Czyż mogło to mieć wpływ na zdrowie ludności? Ogromne straty poniesiono również w innych krajach, ale błędą one wobec 91 mld dolarów, jakie poniesie Białoruś w wyniku wypłacanych rekompensat oraz niepotrzebnego przesiedlenia ludności z terenów, gdzie opad czarnobylski zwiększył zaledwie dwukrotnie naturalną dawkę promieniowania.

Koszt hipotetycznego ocalenia jednego życia ludzkiego przez obniżenie stężenia radonu w mieszkaniach wynosi około 2 mln dolarów, a w wyniku wprowadzenia do amerykańskiego systemu energetyki jądrowej zaleceń ochronnych opartych na hipotezie liniowej 2,5 mld dolarów. W tym przypadku uratowanie życia jest imaginacyjne, lecz tak wielkie sumy zostały rzeczywiście wydatkowane. Natomiast organizacje międzynarodowej pomocy nie mają chronicznie pieniędzy na szczepienia ochronne w krajach trzeciego świata, gdzie koszt uratowania jednego życia wynosi 50 do 100 dolarów. Jest coś głęboko niemoralnego w tego rodzaju ekonomii ochrony zdrowia.

Wydaje się, że nadszedł czas otrzeźwienia i powrotu do racjonalnego myślenia. Czynnikiem inicjującym tę zmianę stał się wspomniany raport UNSCEAR z 1994 roku potwierdzający zjawisko dobroczynnego wpływu na zdrowie małych dawek promieniowania. Ale była nim również terapia wstrząsowa katastrofy czarnobylskiej. Wykazała ona naocznie absurdalność i szkodliwość stosowania w praktyce bezprogowej hipotezy liniowej. Ludzie wielokrotnie w swej historii poddawali się nieracjonalnym złudzeniom, lękom przed końcem świata, czarami, czarownicami, duchami i diabłami. Jeszcze nie tak dawno, tak jak teraz promieniowania, bali się maszyn parowych, elektryczności i szczepień przeciw ospie. Wszystko to minęło i został tylko długi drwiący śmiech pokoleń. Tak też stanie się i z radiofobią, ale upłynie wiele czasu nim w świadomości społecznej promienie radu czy uranu zdomowią się tak jak płomień ognia.

ZBIGNIEW JAWOROWSKI

|  |
|--|
| Prof. dr hab. ZBIGNIEW JAWOROWSKI jest przewodniczącym Rady Naukowej Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) w Warszawie. |
|--|

Tab. 1. Powstawanie nowotworów (w procentach) po jednorazowym napromienieniu trzymiesięcznych myszy promieniowaniem  $^{137}\text{Cs}$ . Według Maisin et al. (1988). W nawiasach podano powstawanie białaczek oczekiwane zgodnie z hipotezą liniową. Wyraźny efekt hormetyczny oznaczono tłustym drukiem.

| Dawka (Gy) | Białaczki            | Raki i mięsaki | Wszystkie nowotwory |
|------------|----------------------|----------------|---------------------|
| 0          | 20,93                | 16,30          | 33,19               |
| 0,25       | 18,18 (21,92)        | 14,04          | 28,51               |
| 0,5        | <b>15,48 (22,91)</b> | <b>8,79</b>    | <b>23,01</b>        |
| 1          | <b>15,04 (24,89)</b> | <b>8,94</b>    | <b>21,95</b>        |
| 2          | 13,82 (28,85)        | 14,29          | 26,27               |
| 4          | 26,57 (36,76)        | 16,08          | 39,16               |
| 6          | 44,68 (44,68)        | 14,36          | 55,32               |

Tab. 2. Zgony na raka piersi wśród 31 710 kobiet kanadyjskich chorych na gruźlicę, napromienionych w czasie prześwietleń rentgenowskich. Efekt hormetyczny wyraźnie widoczny w zakresie dawek 100-190 mGy nie został zauważony przez autorów, którzy stwierdzili, że „Dane były najbardziej zgodne z liniową zależnością między dawką a skutkiem”. Wg Miller et al., 1989.

| Dawka (mGy)   | Zgony na $10^3$ osobolat |
|---------------|--------------------------|
| 0 - 90        | 579                      |
| 100 - 190     | 422                      |
| 200 - 290     | 562                      |
| 300 - 390     | 651                      |
| 400 - 490     | 611                      |
| 700 - 990     | 1362                     |
| 1000 - 2900   | 1382                     |
| 3000 - 5990   | 2334                     |
| 6000 - 10 000 | 8000                     |
| >10 000       | 20 620                   |

Tab. 3. Częstość skutków genetycznych (w procentach) u dzieci rodziców, którzy przeżyli ataki atomowe w Hiroszynie i Nagasaki i zostali napromienieni dawkami 400-600 mSv. Wg Yoshimoto et al., 1991; Awa et al., 1989; Neel et al., 1988.

| Skutek                        | Nie napromienieni   | Napromienieni       |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Zgony niemowląt 1946-1958     | 7,35                | 7,08                |
| Aberracje chromosomowe        | 0,31                | 0,22                |
| Zaburzenia liczby chromosomów | 0,30                | 0,23                |
| Mutacje białek krwi           | $6,4 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{-6}$ |

Tab. 4. Liczba zaburzeń rozwojowych dzieci (na 10 tys.) urodzonych na Węgrzech przed i po katastrofie w Czarnobylu. Średnia dawka od promieniowania czarnobylskiego wynosiła na Węgrzech w roku 1986 0.06-0.5 mSv na osobę (Feher, 1988). Wg Czeizel, 1989

| Zaburzenie rozwojowe | 1980-85 | 1.5.1986  | 1.5.1987  |
|----------------------|---------|-----------|-----------|
|                      |         | 30.4.1987 | 30.4.1988 |
| Zespół Downa         | 8,44    | 7,27      | 6,77      |
| Retinoblastoma       | 0,32    | 0,16      | 0,08      |
| Guz Wilmsa           | 0,80    | 0,47      | 0,56      |

Tab. 5. Roczna śmiertelność ogólna kobiet w Nagasaki (na 100 tys.) w latach 1970-1976. Wg Kondo, 1993.

| Wiek (lata) | Napromienione |        | Nie napromienione |
|-------------|---------------|--------|-------------------|
|             | >10mSv        | <5mSv  |                   |
| 30-39       | 78            | 87     | 103               |
| 40-49       | 218           | 224    | 223               |
| 50-59       | 428           | 569    | 510               |
| 60-69       | 833           | 1303   | 1 516             |
| 70-79       | 3 242         | 4 161  | 5 305             |
| >80         | 13 158        | 12 626 | 19 634            |

Tab. 6. Umieralność na białaczki wśród 9997 mężczyzn zatrudnionych w Kanadyjskich Zakładach Energii Atomowej (AECL). „Rejestr.” oznacza zgony zarejestrowane w AECL; „Oczekiwane” oznacza zgony oczekiwane zgodnie z częstością występującą w ogólnej populacji Kanady. Wg Gribbin et al., 1992.

| Przyczyna zgonu       | Nie napromienieni |            | Napromienieni |            |
|-----------------------|-------------------|------------|---------------|------------|
|                       | Rejestr.          | Oczekiwane | Rejestr.      | Oczekiwane |
| Białaczka limfocytowa | 2                 | 0,85       | 0             | 2,40       |
| Białaczka szpikowa    | 2                 | 1,36       | 2             | 3,50       |
| Inne białaczki        | 1                 | 1,40       | 1             | 1,59       |