

# **Dobroczynne skutki promieniowania jonizującego**

inż. Maciej Wiliński

## Spis treści

1. Wstęp.....	3
2. O promieniowaniu słów kilka – jego wpływ na organizm człowieka.....	4
3. Wpływ dużych dawek promieniowania na organizmy żywe.....	7
4. Wpływ małych dawek promieniowania na organizmy żywe.....	8
5. Trzy teorie na temat szkodliwości i dobroczynności promieniowania.....	11
6. Radon – gaz dobrotliwy, czy szkodliwy?.....	16
7. Problem z prowadzeniem badań na temat wpływu promieniowania na człowieka.....	20
8. Aktualny stan poglądów na relacje pomiędzy hipotezą liniową, a hipotezą hormetyczną....	23
9. Miejsca na świecie z podwyższonym/obniżonym tłem.....	25
10. Wnioski.....	25
11. Bibliografia.....	26

# 1. Wstęp

Powszechnie w społeczeństwie mówi się o promieniowaniu w sposób głównie negatywny. Powstało i nadal powstaje wiele mitów z nim związanych, tworzony jest czarny obraz tego, jakie skutki może mieć „spotkanie z promieniowaniem”. Wiele osób nie zdaje sobie sprawy z tego, że owo promieniowanie nie pochodzi jedynie od źródeł wytworzonych przez człowieka, że na co dzień w sposób naturalny jesteśmy pod jego wpływem z wielu źródeł w otaczającym nas świecie. Pomimo znacznie ułatwionego dostępu do wiedzy (np. internet, wykłady otwarte), wielu akcji promujących rozpowszechnienie rzetelnego i merytorycznego zasobu informacji na ten temat, wciąż są środowiska, które w zjawisku promieniowania jonizującego widzą jedynie śmiertelne zagrożenie dla ludzkości. Strach, który to zjawisko wywołuje w człowieku nie jest niczym dziwnym, pomimo tego, że może on wydawać się czymś irracjonalnym dla osoby, która choć trochę orientuje się w tematach dotyczących promieniotwórczości. Człowiek zawsze obawiał się tego co nieznanego. Lata, w których ludzie karmieni byli pseudonaukowymi wywodami na temat związany z zagrożeniami płynącymi od radioizotopów, gdzie jako główny przykład niebezpieczeństwa pokazywano przypadek Czarnobyla (do którego dorobiono wiele zadziwiających historii) sprawiły, że przed nami jeszcze długa droga, zanim społeczeństwo zrozumie, że promieniowanie jonizujące nie jest jedynie jego wrogiem.

Wciąż za mało mówi się o prawdopodobnym pozytywnym wpływie na organizm człowieka małych dawek promieniowania jonizującego. Powstało już wiele teorii, próbujących opisać skutki podlegania napromienieniu przewyższającym to codzienne, wynikające z tła. Jedną z takich hipotez mówi o zjawisku hormezy. Niestety, pisze się o tym niewiele, pomimo tego, że przeprowadzono już znaczącą liczbę badań na ten temat, które potwierdziły jej słuszność. Samo pojęcie hormezy oznacza pozytywne w skutkach działanie nieznacznych dawek trucizny. Od wieków znane jest powiedzenie Paracelsusa, że to „dawka czyni truciznę”, które jest powszechnie akceptowane przez ekspertów w dziedzinie toksykologii, natomiast w przypadku promieniowania jonizującego wciąż budzi kontrowersje. Powszechną „wiedzą”, z którą można spotkać się w społeczeństwie jest sformułowanie, że promieniowanie jest zawsze szkodliwe, niezależnie od dawki. Jednak czym jest owa hormeza radiacyjna i czy małe dawki promieniowania mogą mieć korzystny wpływ na organizm człowieka? W poniższej pracy postarano się przedstawić teorie i doświadczenia, które na przestrzeni ostatnich lat starały się zbadać to zjawisko.

## **2. O promieniowaniu słów kilka – jego wpływ na organizm człowieka**

Mówiąc o napromienieniu organizmu mamy na myśli wchłonięcie dużej ilości promieniowania jonizującego, prowadzące do zaburzenia równowagi biologicznej i zmian procesów życiowych z tego wynikających. Skutki biologiczne [1][2][4] tego efektu zależą od takich zmiennych, jak:

- wielkość dawki,
- rodzaj promieniowania,
- warunki napromienienia,
- moc dawki,
- sposób frakcjonowania (organizm lepiej toleruje dawkę rozłożoną na kilka pomniejszych dawek, podawanych w pewnych odstępach czasu),
- rodzaju narządów (ze względu na różną wrażliwość na promieniowanie),
- masy napromienionych tkanek (im większa masa tkanek, tym wyraźniejsze efekty),
- natlenowania tkanek (lepsze zaopatrzenie w tlen zwiększa promienioczułość),
- cechy biologiczne ustroju.

Natomiast same skutki działania promieniowania jonizującego można podzielić na następujące:

- brak reakcji organizmu na zjawisko,
- przejściowa zmiana czynnościowa lub morfologiczna,
- zmiana trwała,
- śmierć nekrotyczna komórki w wyniku uszkodzenia błony komórkowej lub apoptozy (samobójcza śmierć komórki).

Aby jednak doszło do powstania uszkodzeń w komórce najpierw musi zaistnieć podstawowy mechanizm do tego się przyczyniający – tworzenie się wolnych rodników pod wpływem promieniowania jonizującego [1][2].

Wolne rodniki są to chemicznie agresywne cząsteczki, zdolne do uszkodzania takich struktur jak DNA, czy innych większych molekuł ważnych do życia komórki. Samo uszkodzenie DNA można w tym przypadku podzielić na kilka rodzajów [2]:

- zerwanie pojedynczej nici DNA,
- zerwanie podwójnej nici DNA,

- uszkodzenie zasad azotowych,
- uszkodzenie cukrów w DNA,
- powstanie krzyżowych połączeń białek jądrowych z DNA w obrębie jednej lub dwóch nici,
- powstanie połączeń krzyżowych pomiędzy DNA.

Opisując wpływ promieniowania na żywe organizmy można mówić o promienioczułości komórek [1]. Jest ona proporcjonalna do szybkości podziałów komórkowych i odwrotnie proporcjonalna do stopnia ich zróżnicowania (co wynika z prawa Bergonie i Tribondeau [8]). Badania opisujące wpływ promieniowania na komórki człowieka mogą być przeprowadzane w laboratoriach, na odpowiednich kulturach tkankowych. Dzięki temu możliwe było określenie jak dany rodzaj tkanek reaguje w przypadku bycia napromienionym. Najbardziej promienioczułe w żywym organizmie są zatem [4]:

- szpik,
- tkanka limfatyczna,
- komórki płciowe,
- nabłonek jelit.

Mniej czułe są natomiast:

- komórki mięśniowe,
- narządy mięszone,
- tkanka nerwowa,
- tkanka łączna.

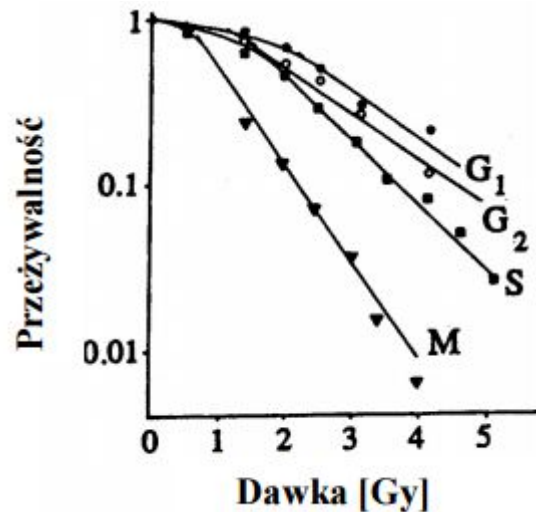
Wykonując takie badanie można określić relację pomiędzy dawką, a powstałym efektem biologicznym (np. śmiercią komórek). Zależność ta została zaprezentowana w postaci poniższych krzywych, pokazujących przeżywalność tkanek w poszczególnych fazach cyklu komórkowego.

*G1 – faza poprzedzająca syntezę DNA*

*S – synteza DNA*

*G2 – faza poprzedzająca mitozę*

*M – mitoza*



Rys. 1 Krzywa przeżywalności komórek ludzkich w różnych jego fazach. [1]

Uszkodzenia komórek nie powstają jedynie na skutek oddziaływania z promieniowaniem jonizującym. Każdego dnia w ciele człowieka, w każdej komórce tworzy się około  $10^6$  spontanicznych uszkodzeń DNA [4]. Wynikają one głównie z powodu wolnych rodników powstających w trakcie metabolizmu. Organizm potrafi jednak się przed nimi bronić, uruchamiając w przypadku otrzymania sygnału o uszkodzeniu wewnątrzkomórkowym produkcję enzymów naprawiających uszkodzenia oraz inne procesy niezbędne do funkcjonowania danej komórki. Identycznie dzieje się w przypadku komórek napromienianych.

Jako ciekawostkę można dodać, że obecny w Polsce system ochrony radiologicznej dopuszcza dla ogółu ludności roczną dawkę 1 mSv (ponad naturalne tło). Dawka ta odpowiada 0,005 uszkodzenia DNA na komórkę na dzień. Oznacza to, że liczba ta jest o kilka rzędów wielkości niższa niż ta wynikająca z naturalnych przemian w organizmie [2].

W przypadku organizmów znajdujących się na początku swojego życia, w postaci zapłodnionego jaja, zarodka, a następnie płodu również można mówić o skutkach napromienienia. Zależą one od wielkości dawki i okresu ciąży – we wcześniejszych jej fazach zarodek jest znacznie wrażliwszy na negatywny wpływ promieniowania i w przypadku dużych dawek może ono prowadzić do jego śmierci, a do końca 6 tygodnia (czyli organogenezy) do wystąpienia wad wrodzonych [1][4][2].

Warto jednak zaznaczyć, że napromienienie dorosłego człowieka nie prowadzi do zmian genetycznych u jego potomstwa. Jednym z przykładów potwierdzających tę tezę jest potomstwo osób, które przeżyły wybuch jądrowy w Nagasaki czy Hiroshimie. Nie stwierdzono u ich dzieci zaburzeń genetycznych – wręcz przeciwnie, wśród potomstwa osób, które otrzymały dawkę poniżej 0,5 Sv zauważono zmniejszoną umieralność niemowląt, mniej zmian liczby chromosomów, mniej mutacji białek krwi, jak i aberracji chromosomalnych [3].

### 3. Wpływ dużych dawek promieniowania na organizmy żywe

W momencie, gdy promieniowanie przekroczy pewien próg i zaczyna na poziomie komórkowym wywoływać znaczne zakłócenia w jej funkcjonowaniu (łącznie z jej śmiercią), przez co zachodzą poważne zmiany w działaniu narządów, należy mówić o deterministycznym wpływie promieniowania. Wzrasta on wraz ze wzrostem dawki wyższej od progowej. Zmiany w narządach po napromienieniu dużą dawką obejmują [4][1]:

- uszkodzenia limfocytów krwi,
- oparzenia skóry,
- ostrą chorobę popromienną,
- wyłysienie,
- niepłodność,
- ostre zapalenie jelit,
- niedokrwistość,
- zmętnienie soczewek (mogące prowadzić do zaćmy).

W przypadku gdy mówimy o procesach, które mają szansę zaistnieć po przekroczeniu pewnej dawki progowej, mamy na myśli skutki stochastyczne. Te zmiany obejmują [1][4]:

- nowotwory złośliwe i białaczki,
- skrócenie czasu życia,
- inne (jak zaćma czy bezpłodność).

W przypadku dużych dawek promieniowania, przekraczających 1 Sv wzrasta liniowo ryzyko zachorowania na śmiertelny nowotwór.

Objawy skutków stochastycznych mogą wystąpić po dosyć długim czasie (20 lat i więcej) od chwili napromienienia. Utrudnia to w sposób znaczny stwierdzenie, że właśnie to zdarzenie było ich przyczyną. Dane otrzymane z badań wskazują na to, że liczba wewnątrzkomórkowych uszkodzeń DNA jest proporcjonalna do dawki. Nie jest to jednak jednoznaczne z tym, że na wyższym poziomie organizacji (tkanki, narządy, cały organizm) ta zależność jest dalej liniowa. Do oceny skutków należy dodatkowo wziąć pod uwagę wielkość i moc dawki, jak i takie czynniki jak stan immunologiczny organizmu czy złożoność rozwoju nowotworu. Należy być bardzo ostrożnym mówiąc o skutkach stochastycznych, ze względu na ich złożoność, jak i trudność weryfikacji czy dany objaw na pewno został spowodowany przez promieniowanie [5].

## 4. Wpływ małych dawek promieniowania na organizmy żywe

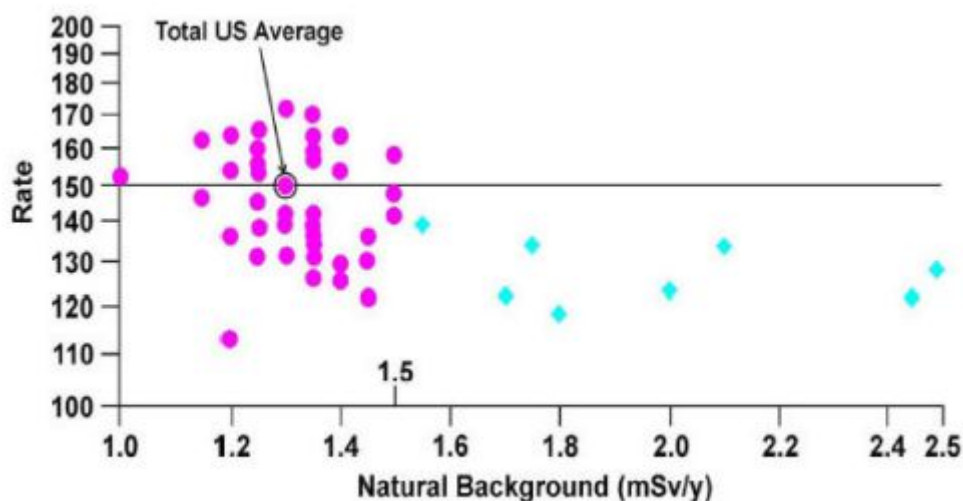
Powszechnie znane są skutki wynikające z naświetlenia dużymi dawkami promieniowania i konsekwencje z tego wpływające. Określone są pewne granice, po których następuje niezwykle groźna dla człowieka choroba popromienna. Jednakże wpływ małych dawek, poniżej 200 mSv, wciąż budzi kontrowersje. Ze względu na trudność w przeprowadzaniu badań na tym podłożu problematyczne staje się znalezienie wiarygodnych materiałów statystycznych, co powoduje, że wiele wniosków wyciąga się z braku obserwacji skutków popromiennych dla takiego przypadku. Powoduje to również społeczny problem – jednoznaczne rozstrzygnięcia kwestii małych dawek przełożyłoby się po pewnym czasie na stosunek społeczeństwa do wykorzystania promieniowania jonizującego. Ze względu na brak jednoznacznego stanowiska w tej sprawie na chwilę obecną przyjmuje się za podstawę hipotezę liniową bezprogową [5][9]. Ryzyko śmiertelnego zachorowania pod wpływem promieniowania jonizującego jest, zgodnie z nią, proporcjonalne do otrzymanej dawki.

Hipoteza ta przyjmuje, że efekty płynące z napromienienia rosną liniowo już od zerowej dawki. Współczesne badania wskazują jednak na to, że takie założenie jest fałszywe (szczególnie w obszarze niskich dawek, poniżej 100 mSv, jak i małych ich mocy) [10]. Znacznie częściej można zaobserwować reakcję na promieniowanie zaczynającą się po przekroczeniu pewnego progu dawki. Pomimo to, Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) zaleca tę hipotezę jako podstawę uregulowań prawnych w dziedzinie ochrony radiologicznej [4].

Na podstawie wielu przeprowadzonych badań, jak i obserwacji z rejonów o podwyższonym promieniowaniu tła stwierdzono, że takie założenia są błędne. Poniżej przedstawiono wyniki badań przeczący słuszności teorii bezprogowej.

W jednej z miejscowości USA o podwyższonym poziomie promieniowania roczna umieralność na raka okazała się o 10-15% niższa [6][7][4].

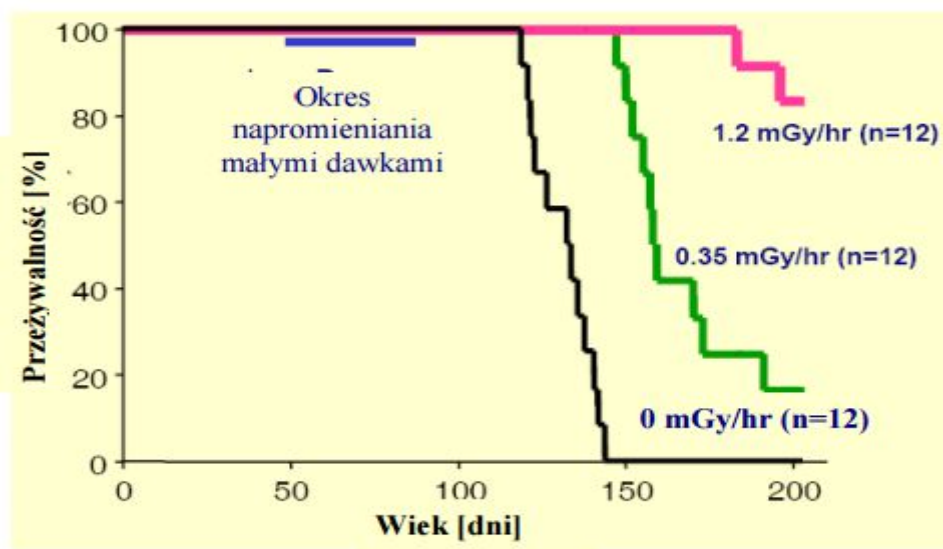




Rys. 2. Roczna śmiertelność na raka w USA, na 100 tys. ludzi w latach 1950-67. [1]

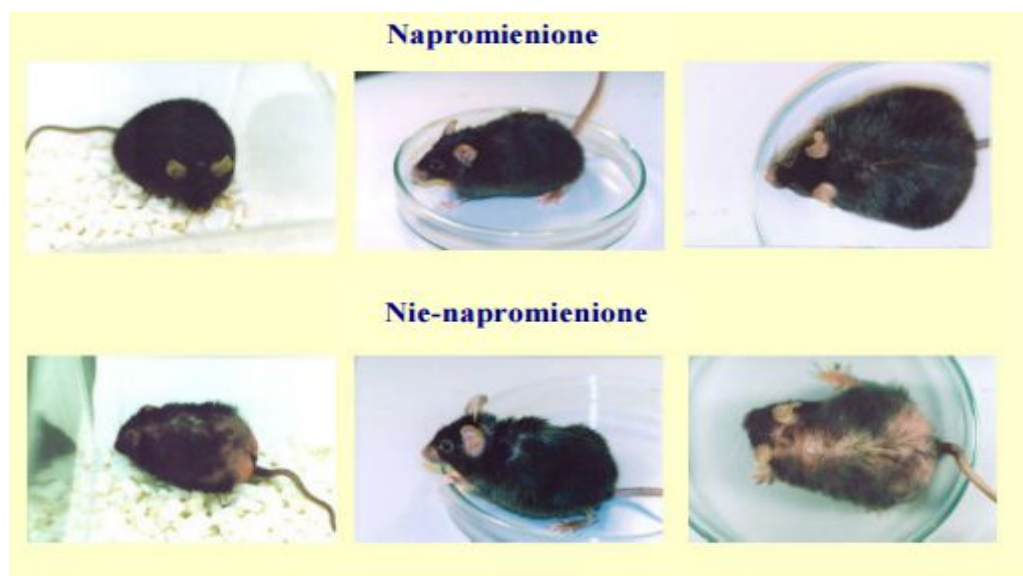
Z uzyskanych danych wynika, że napromienienie ciała małą dawką rozłożoną w odpowiednim czasie może zwiększyć jego reakcje odpornościowe. Aczkolwiek, zastosowanie większych dawek może przynieść przeciwne skutki. Wykonując badanie na myszach, napromieniowując je dawką 0,2 Sv zaobserwowano ponadprzeciętny wzrost poziomu przeciwciał w surowicy. Natomiast przy dawce równej 0,5-1 Sv zaobserwowano dwukrotne zmniejszenie częstości pojawiania się raków i mięsaków [6][7][4].

Kolejną istotną obserwacją było stwierdzenie, że czas życia myszy poddawanych napromienieniu przy użyciu małych dawek wzrósł, co przedstawiono na następującym wykresie:



Rys. 3 Przeżywalność myszy napromienianych przez 5 tygodni dawkami o mocy 0,35 lub 1,2 mGy na godzinę i porównanie ich z grupą kontrolną. [1]

Dodatkowo sam ich wygląd świadczył o pozytywnym wpływie promieniowania, ze względu na zmniejszenie się efektu starzenia (Rys. 4):



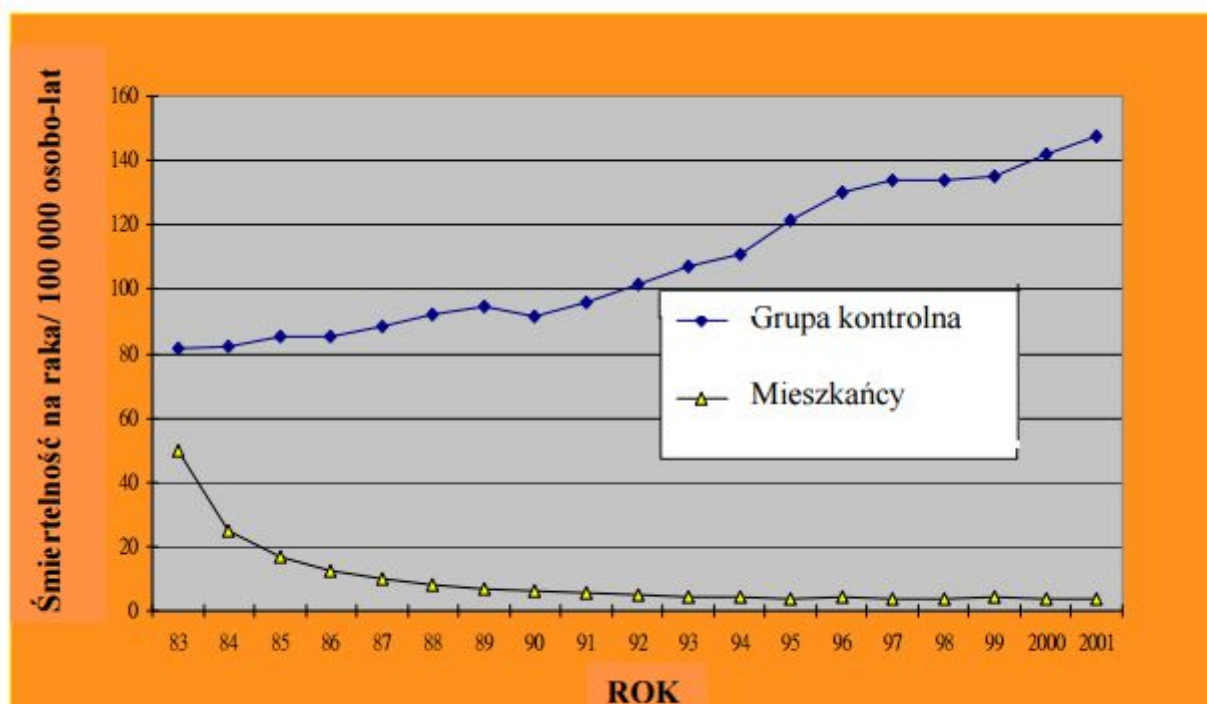
Rys. 4 Wygląd myszy po 90 dniach. [1]

W celu zbadania odporności myszy na czynniki rakotwórcze podawano im metylocholanren. I w tym badaniu zaobserwowano, że w przypadku myszy żyjących z większym napromienieniem zachorowalność na raka była znacząco niższa [6][7][4][1].

Przeprowadzono jeszcze szereg innych obserwacji na grupach ludzi, którzy mieli styczność z podwyższonym promieniowaniem, np.:

- Mieszkańcy Nagasaki zostali napromienieni dawką poniżej 0,1 Sv (lecz o dużej mocy). Zaobserwowano u nich zmniejszoną zapadalność na białaczkę, raka płuc i raka jelita grubego [4].

- Pacjenci chorzy na białaczkę byli poddawani eksperymentalnemu leczeniu nowotworów. Polegało ono na napromienieniu całego ciała, lub jego połowy małymi dawkami. Pacjenci leczeni chemioterapią mieli szansę na przeżycie równą 50%. W przypadku leczonych małymi dawkami wzrosła ona aż do 84% [6].
- Śmiertelność pracowników jądrowego przemysłu stoczniowego, którzy są narażeni na promieniowanie gamma jest znacznie niższa niż pracowników tej samej stoczni nie mających do czynienia z promieniowaniem [7].
- Śmiertelność ze względu na raka płuc wśród pacjentów chorych na gruźlicę, będących jednak poddawanych częstym prześwietleniom rentgenowskim jest niższa [2].
- Na skutek niedopatrzenia budowlanego władz Tajwanu, znaczna liczba ludności (ok. 10 tysięcy) mieszkała przez 9 do 20 lat w osiedlu złożonym z domów, w których stal zbrojeniowa była zanieczyszczona silnym źródłem kobaltowym. Nieświadomi mieszkańcy otrzymali średnio dawki rzędu 0,4 Sv. Po odkryciu tego problemu ludność została przebadana. Około 10% mieszkańców otrzymało dawkę 525 mSv w skali roku, łączną na przestrzeni 20 lat aż 4 Sv. 9% ludności w tym czasie łącznie 420 mSv, a pozostałe 80% dawkę łączną rzędu 120 mSv. U żadnego z mieszkańców nie stwierdzono objawów choroby popromiennej, zaobserwowano natomiast zmniejszoną śmiertelność na nowotwory. Nie zauważono również zwiększonej liczby innych objawów, wynikających z otrzymania dużej dawki promieniowania, wręcz przeciwnie – w porównaniu do ogółu ludności te liczby znacznie się obniżyły. Dane te są przedstawione na wykresie (Rys. 5) [1][10].

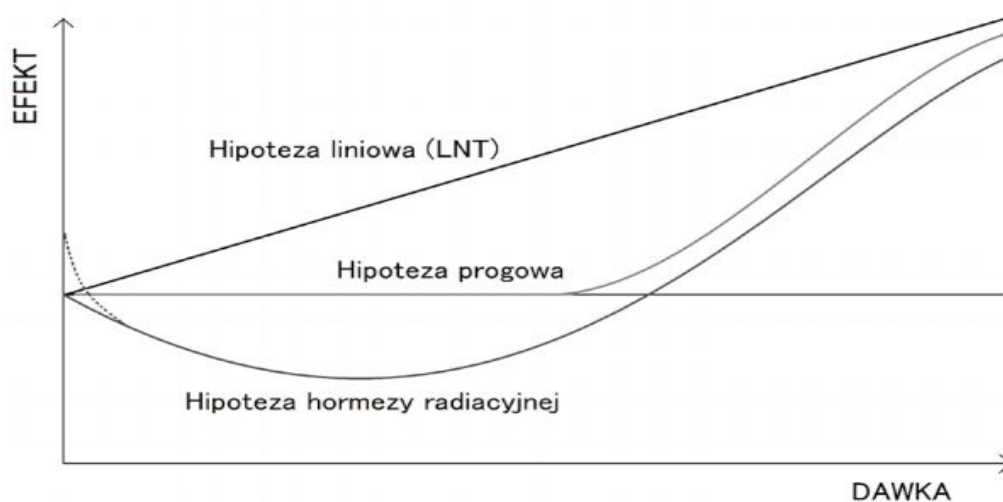


Rys. 5 Śmiertelność wśród mieszkańców błędnie zbudowanego osiedla w Tajwanie [1].

## 5. Trzy teorie na temat szkodliwości i dobroczynności promieniowania

Na chwilę obecną rozważane są głównie trzy najbardziej popularne hipotezy, omawiające zależność efektu zdrowotnego od otrzymanej dawki promieniowania jonizującego. Są to:

- hipoteza liniowa bezprogowa,
- hipoteza progowa,
- hipoteza hormezy radiacyjnej.



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie idei trzech hipotez zależności efektu od dawki [12].

### 5.1. Hipoteza liniowa bezprogowa

Jest to hipoteza zakładająca, że ryzyko rośnie liniowo razem z dawką. W jej przypadku zakłada się, że jakakolwiek dawka otrzymana jest już szkodliwa, niezależnie od tego jak niska by była. O ile jest to słuszne w przypadku dużych dawek promieniowania, których efekty dosyć szybko można zauważyć, o tyle w przypadku niskich wartości napromienienia teoria przestaje pokrywać się z danymi doświadczalnymi. Jest to obecnie hipoteza promowana przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej i zalecana jako podstawa regulacji prawnych w dziedzinie ochrony radiologicznej [10].

### 5.2. Hipoteza progowa

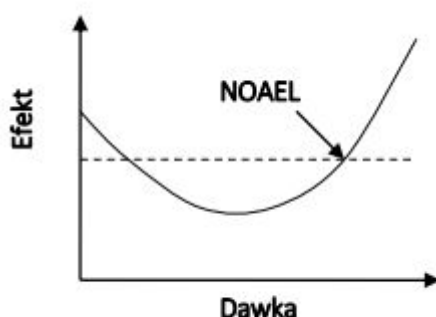
Hipoteza ta zakłada istnienie pewnego progów dawki, powyżej którego pojawiają się negatywne skutki dla organizmu człowieka. Poniżej tego progów promieniowanie nie ma wpływu na organizmy.

Można stwierdzić, że jest ona ulepszoną wersją pierwszej hipotezy, która stara się wyjaśnić problem niskich dawek [10].

### 5.3. Hipoteza hormezy radiacyjnej

Zgodnie z definicją przytoczoną w rozdziale 1. – hormeza jest zjawiskiem reakcji organizmu na małe dawki toksyn, a w tym przypadku – promieniowania jonizującego. Teoria ta nie zakłada, że małe dawki powodują jedynie proporcjonalnie mniejsze zniszczenia w organizmie. Mówi ona o przypadku, w którym jego system immunologiczny jest pobudzany, zwiększając swoją ogólną odporność. Oznacza to, że małe dawki wpływają w sposób korzystny na organizm [10][9].

Przyglądając się wykresowi krzywej odpowiedzi organizmu na dawkę (Rys. 7), można zauważyć, że dla pewnych jej wartości zmniejsza się śmiertelność, czy zachorowalność organizmu na nowotwory, ale dla dawek większych od pewnej wartości już ponownie ona rośnie. Linia przerywana na wykresie oznacza reakcję organizmu niepoddanego działaniu rozpatrywanych dawek (grupa kontrolna). Problem w badaniu tego zjawiska stanowi ustalenie obszaru dawek, w którym obserwuje się efekty hormetyczne [3]. Na rysunku jest on ograniczony punktami przecięcia linii ciągłej z linią przerywaną. Punkt z prawej strony jest zwany punktem NOAEL (z ang. No Observed Adverse Effect Level) i oznacza dawkę, poniżej której nie zaobserwowano negatywnych skutków jej działania. Obszar poniżej lewego punktu przecięcia jest przedmiotem głównie spekulacji, ze względu na to, że najniższa dawka dająca zerowe skutki stanowi zazwyczaj do 10% dawki NOAEL. Wartości te są problematyczne, gdyż zdobycie rzetelnych informacji na ten temat jest trudne (patrz rozdział 7). Zakłada się zatem, że poniżej tej dolnej granicy nie obserwuje się skutków promieniowania [3].

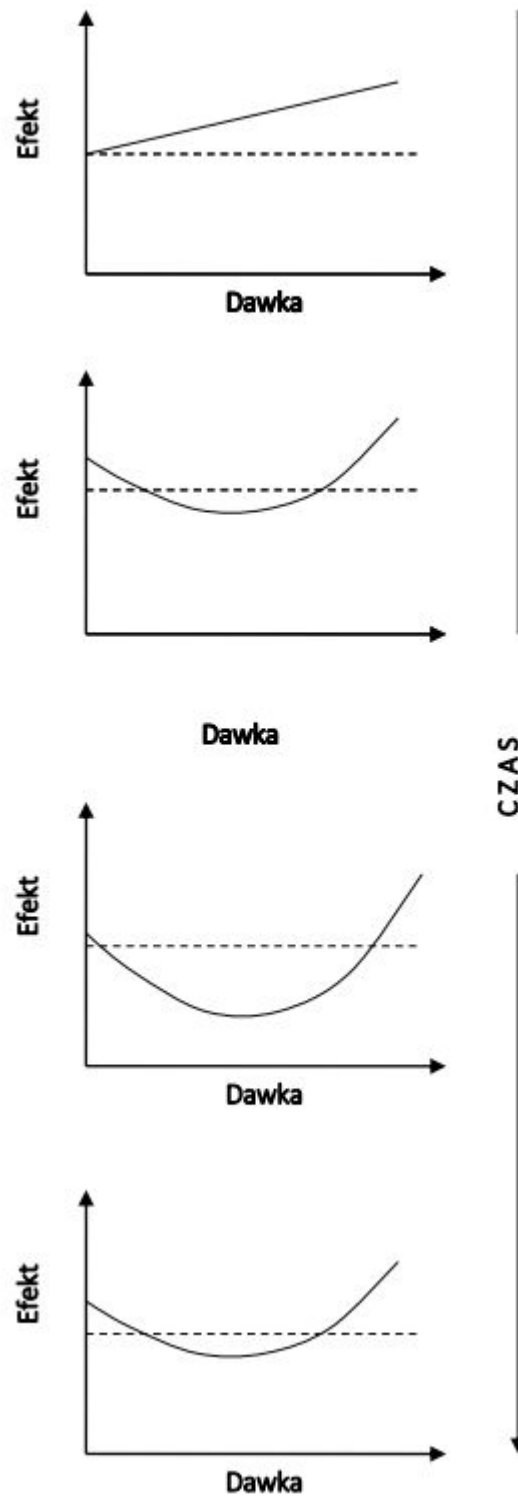


Rys. 7 Hormeza radiacyjna. Punkt NOAEL. [3]

Innym ważnym aspektem badania hormezy radiacyjnej jest czas. W tym przypadku wyróżnić można dwie opcje:

- reakcja na małe dawki jest natychmiastowa, organizm przystępuje do obrony [3][4],
- zaburzenie równowagi organizmu powoduje stopniową reakcję obronną, w czasie której jego siły obronne przygotowują się do większego zagrożenia [3][4].

W przypadku drugiej opcji można przedstawić to w sposób schematyczny:



Rys. 8 Rozwijanie się efektu hormetycznego w kolejnych fazach. [3]

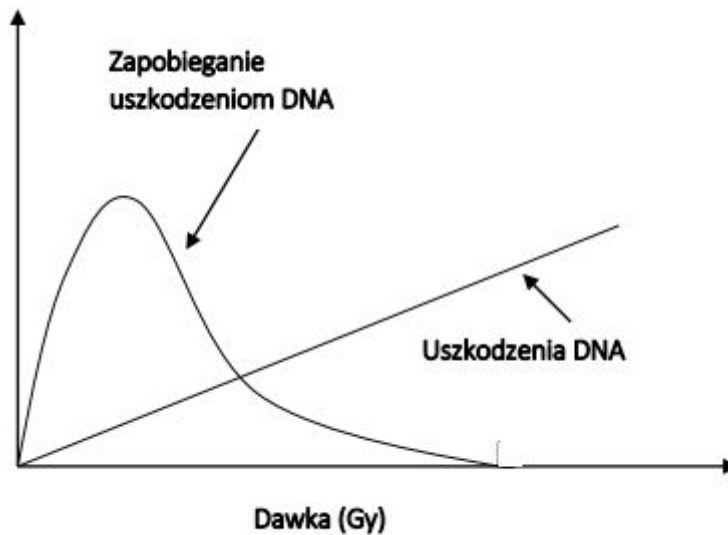
W początkowych chwilach organizm odczuwa jedynie negatywne skutki promieniowania, tym większe, im większa jest dawka. Po pewnym czasie zaczyna kompensować ujemne skutki i w obszarze małych dawek pojawia się efekt stymulacyjny. Wraz z upływem czasu w tym obszarze efekt kompensacyjny osiąga swoje maksimum, a przy dużych dawkach organizm przestaje być w stanie usuwać uszkodzenia. Następnie organizm zaczyna powracać do stanu równowagi.

Liczne przykłady tego efektu pozyskane w trakcie wielu badań wskazują na to, że mamy do czynienia z raczej regułą niż wyjątkiem, mówiąc o tego typu reakcji.

Problem tego typu odpowiedzi na promieniowanie jonizujące już od dłuższego czasu budzi kontrowersje [6]. Patrząc na społeczny strach przed radiacją oraz skutkami z niej płynącymi prostsze jest przyjęcie do wiadomości hipotezy liniowej bezprogowej, pomimo tego, że nie jest ona w stanie wyjaśnić wielu zjawisk. Teoretycznie takie podejście nie powoduje żadnych trudności i tworząc zasady ochrony radiologicznej co najwyżej się „przesadzi”. Jednakże, patrząc z perspektywy hormezy, takie podejście również może być szkodliwe dla żywych organizmów. Na chwilę obecną zaleca się, aby ogół ludności nie przyjmował rocznie dawki większej niż 1 mSv, co stanowi około 40% średniej dawki promieniowania naturalnego [11]. Obserwując jednak dane z wielu badań, można zauważyć, że zróżnicowanie poziomu promieniowania tła na Ziemi potrafi sięgać ponad 100-krotnie przewyższa zalecaną przez ustawę dawkę minimalną, a mieszkańcy obszarów, gdzie takie zjawisko występuje nie chorują ani częściej, ani bardziej dotkliwie. Wskazuje to na umiejętność przystosowania się systemu immunologicznego do takich warunków.

Uszkodzenia DNA powstają przez agresywne tlenki, głównie wolne rodniki, które powstają w organizmie na skutek przemian metabolicznych, wywoływanych również przez działanie zewnętrznych toksyn, jak i w sytuacji braku pewnych składników odżywczych, działających jako przeciwutleniacze. Szacuje się, że dziennie w ludzkim ciele na ok. 10<sup>14</sup> komórek powstaje ok. 10<sup>9</sup> uszkodzeń wynikających z naturalnych procesów. Bez sprawnego systemu odpornościowego, który naprawia te zniszczenia nie byłibyśmy w stanie długo przeżyć. Według przeprowadzonych badań otrzymanie dodatkowej, rocznej dawki 1 mSv sprawia, że efekty pochodzące od niej są w ostateczności ok. 10<sup>6</sup> razy słabsze, zatem nawet stukrotne podwyższenie poziomu promieniowania nie wywoła efektu podobnego do tego otrzymywanego z naturalnego metabolizmu [4].

W takim przypadku można mówić, że w obszarze małych dawek mają miejsce dwa efekty: uszkodzenie DNA oraz stymulacja układu fizjologicznego. Przy dawkach dostarczanych jednorazowo, rzędu do 0,2 Sv, następuje sygnalizacja uszkodzeń [4]. Przy dawkach przekraczających 0,5-0,6 Sv układ zapobiegania zniszczeniom komórek przestaje działać i jedynym sposobem obrony staje się samobójcza śmierć uszkodzonych komórek, czyli apoptoza. Oba te efekty prowadzą do hormezy, zgodnie z Rys. 9.



Rys. 9 Wpływ hormezy na DNA. [3]

Organizm, będąc stymulowanym przez promieniowanie jonizujące, zaczyna zmniejszać uszkodzenia DNA pochodzące również z innych źródeł. Jest to efekt niezwykle korzystny [1][4][6]. Inną istotną sprawą jest fakt, że w zależności od rodzaju uszkodzeń jądra komórkowego do działania obronnego przystępują różne zespoły genów – innymi słowy w przypadku małych dawek pracuje inny zespół genów niż w wypadku dużych. Tego rodzaju efekty potwierdza m.in. eksperymentalna na tę chwilę terapia leczenia raka poprzez napromienienie połowy lub całego ciała małymi dawkami promieniowania jonizującego, jak to ma miejsce we wspomnianej w rozdziale 4. metodzie leczenia białaczki [6][1]. Wyniki tego rodzaju wskazują na to, że wstępne naświetlenie małymi dawkami wzmacnia odporność systemu na skutki działania dużych dawek, jak i przeciwdziała wywołaniu i rozprzestrzenianiu się uszkodzeń nie wynikających z promieniowania.

## 6. Radon – gaz dobrotliwy, czy szkodliwy?

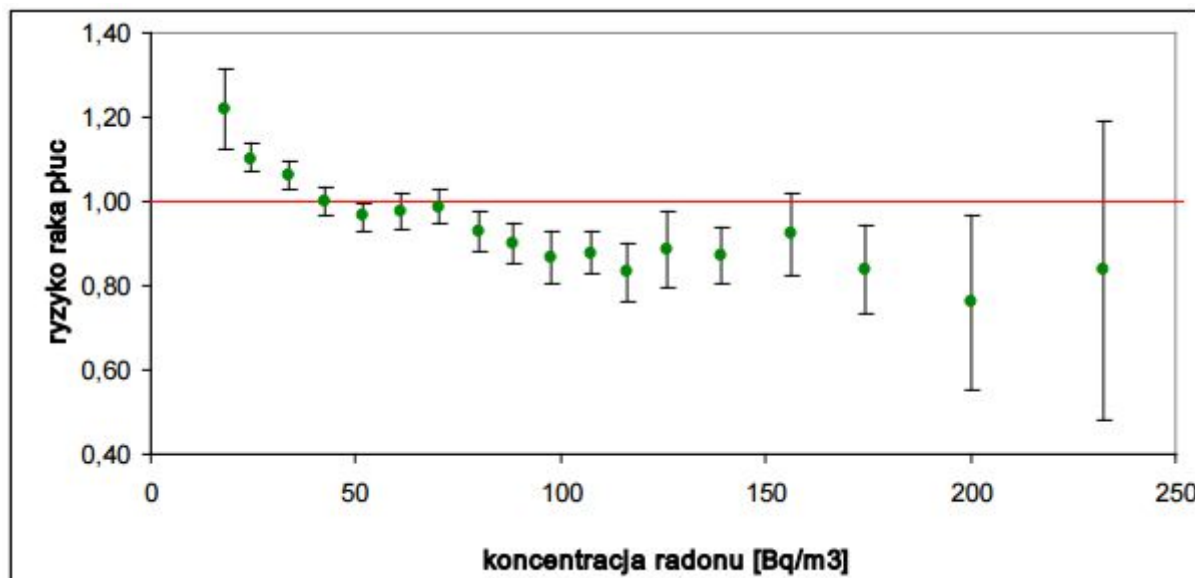
Ważnym elementem w badaniach na temat skutków promieniowania jonizującego jest radon. W powszechnej świadomości uznawany jest za gaz szkodliwy, odpowiedzialny za znaczącą liczbę chorób nowotworowych płuc. W ciągu ostatnich lat przeprowadzono liczne badania łączone wielu niezależnych wyników. Tego typu analizy stwarzają jednak pewne problemy. Przede wszystkim – nie są uwzględniane wszystkie wyniki. Dodatkowo, z góry zakładana jest słuszność hipotezy liniowej bezprogowej. Właśnie ten drugi problem najbardziej wpływa na interpretacje otrzymywanych wyników. Założenie słuszności jedynie hipotezy liniowej prowadzi do stwierdzenia faktu, że zależność dawka-efekt nigdy nie może być pozytywna w skutkach dla zdrowia. Innymi



słowy, założenie na wstępie tej hipotezy będzie prowadziło wskutek analizy wyników do jej potwierdzenia.

Pierwszy problem, czyli pomijanie części wyników, również utrudnia rzetelną analizę zjawiska. Odrzucane są te badania, które wskazują na efekt przeciwny do założonego, czyli badania wskazujące na pozytywne skutki wpływu radonu na zdrowie. A jest ich niemało [10].

Najważniejsze, warte wymienienia, to badania z niemieckiej Saksonii, z amerykańskiego hrabstwa Worcester oraz z USA. Dane otrzymane z tych badań przedstawiono poniżej na wykresach.

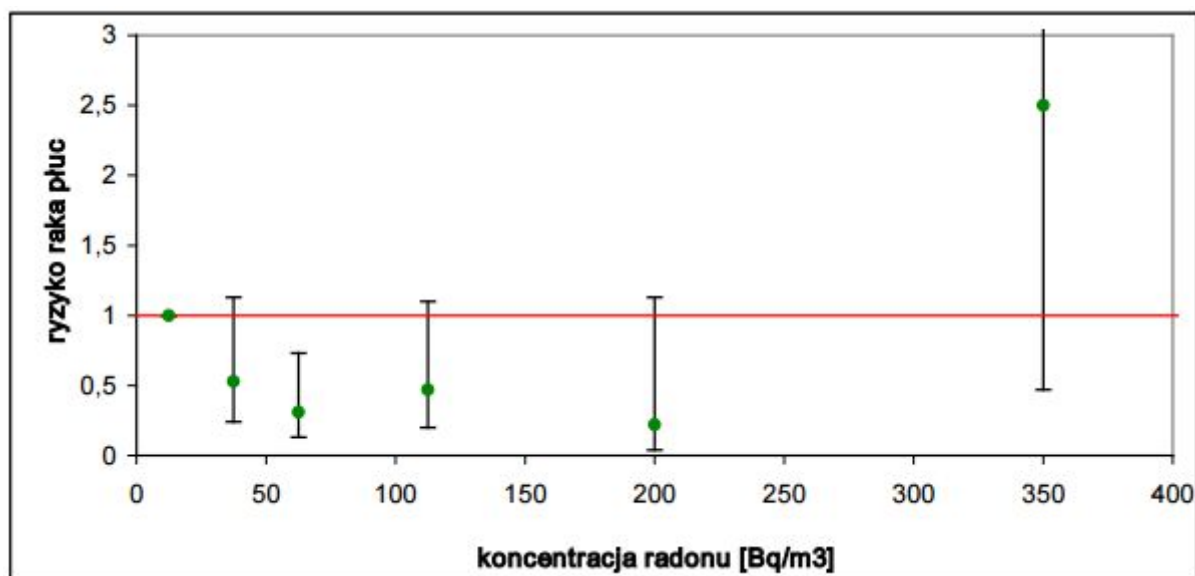


Rys. 10 Wpływ stężenia Radonu na ryzyko wytworzenia się nowotworu wśród badanych amerykańców [10].

Wyniki badań pokazane na rys. 10 dotyczą grupy około 400 tys. amerykańców [10][6]. Tak duża liczebność próby pozwoliła uzyskać stosunkowo niewielkie niepewności pomiarowe (poza obszarami granicznymi). Przeprowadzana analiza uwzględniała wiele współczynników mogących wpłynąć na otrzymany rezultat, takich jak:

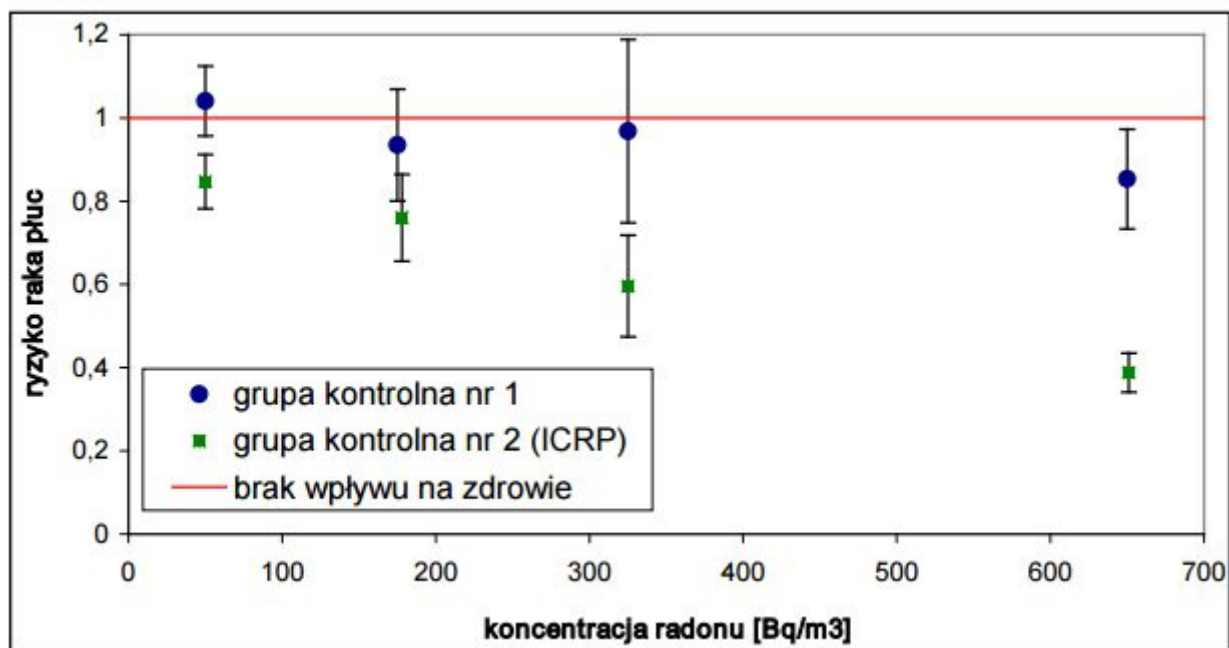
- palenie papierosów,
- miejsce zamieszkania,
- wiek,
- zawód,
- płeć,
- status społeczny,

i wiele innych. Wyniki otrzymane w tym badaniu stanowią jeden z najlepiej udokumentowanych przypadków hormezy radiacyjnej.



Rys. 11 Stężenie radonu, a ryzyko powstania nowotworu w hrabstwie Worcester. [10]

Na rys. 11 przedstawiono wyniki badania w hrabstwie Worcester. W tej sytuacji można mówić o jednej z najbardziej dokładnych analiz ryzyka radonowego [6][10]. Autorzy pracy nie założyli z góry słuszności hipotezy liniowej, przez co wyniki przez nich uzyskane także potwierdzają teorię hormezy radiacyjnej.



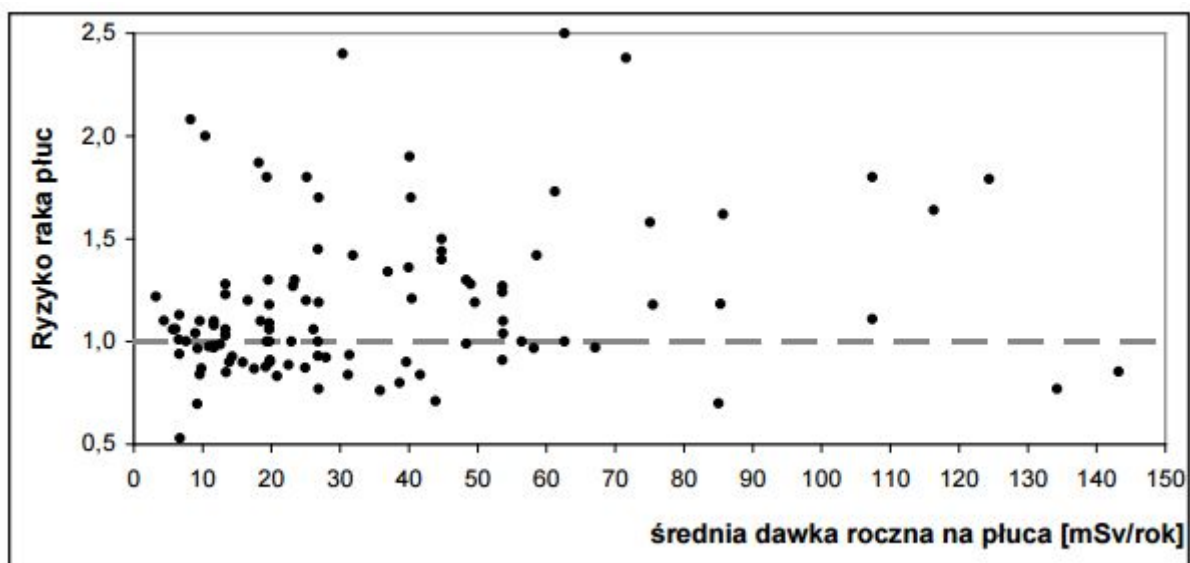
Rys. 12 Stężenie radonu, a ryzyko powstania nowotworu w niemieckiej Saksonii. [10]

Rys. 12 przedstawia wyniki uzyskane przez K. Beckera podczas badania wpływu wysokości stężenia radonu na ryzyko zachorowalności na raka płuc. I w jej wynikach dostrzec można potwierdzenie słuszności teorii hormezy radiacyjnej.

Aby wyciągnąć rzetelne wnioski dotyczące wpływu radonu na zdrowie człowieka, należy na równi traktować wszelkie prace, zarówno te potwierdzające hipotezę hormezę radiacyjną, jak i optujące za teorią liniową. W celu wykonania takiej analizy wykorzystana została bayesowska analiza statystyczna danych [10], ze względu na to, że nie wymaga ona żadnych odgórných założeń. Przeanalizowano 28 prac na ten temat. Każda z tych publikacji dotyczyła innego sposobu ekspozycji na promieniowanie, badania różniły się też metodologią ich prowadzenia. Tak wiele prac i sposobów opracowywania danych może budzić wątpliwość odnośnie skuteczności ich zbiorczej analizy. Jednakże, wyniki zostały unormowane, a pod uwagę brano nie stężenie radonu, a średnią roczną dawkę równoważną na płuca. W tym celu zastosowano następujący przelicznik:

$$1 \frac{Bq}{m^3} = 0,179 \frac{mSv}{rok}$$

Otrzymane wyniki przedstawiono na wykresie:



Rys. 13 Ryzyko raka płuc dla 28 niezależnych badań radonowych, w zależności od średniej rocznej dawki równoważnej. [10]

Używając metod bayesowskich [10] do wszystkich wyników z dwudziestu ośmiu prac dopasowano siedem podstawowych modeli matematycznych:

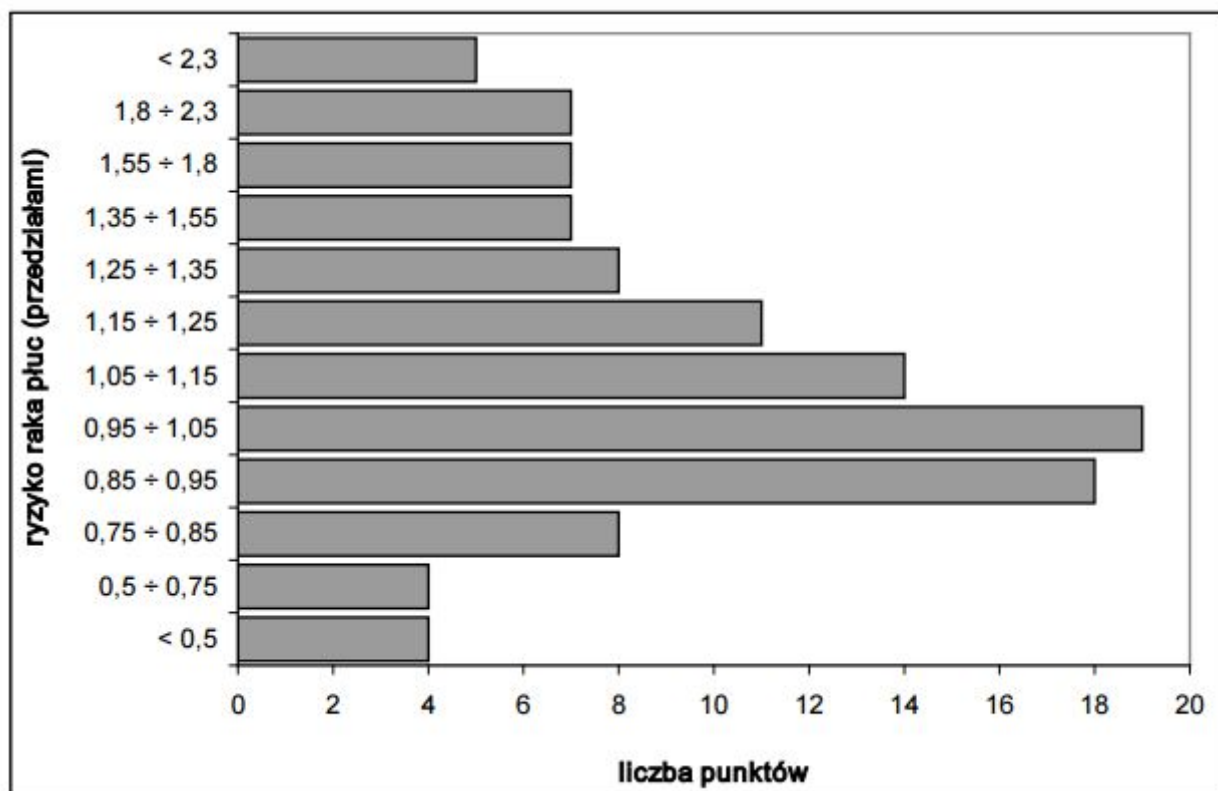
- dwa stałe (niezależne od dawki),
- trzy liniowe (w tym hipoteza liniowa bezprogowa),
- dwa kwadratowe (w tym hipoteza hormezy radiacyjnej).

W uzyskanych wynikach ryzyko raka płuc równe 1 oznaczało model stały, czyli ryzyko ani nie

wzrastało, ani nie malało. Co ciekawe, podstawowy model liniowy wskazywał na spadek ryzyka w zależności od dawki. Niestety, wskutek tej analizy model hormetyczny okazał się najmniej prawdopodobny, ze względu na znaczny rozrzut otrzymanych wyników, utrudniający dopasowanie bardziej skomplikowanej krzywej. Warto odnotować jest to, że rozrzut jest taki sam nawet jeśli wyeliminuje się z badania dane uzyskane z wcześniej wspomnianych badań na grupie 400 tys. Amerykanów czy z hrabstwa Worcester (rys. 10 i 11).

Ponadto badania bayesowskie wykazały do tego, że model stały, niezależny od dawki, jest aż 90 razy bardziej prawdopodobny od modelu liniowego bezprogowego, co oznacza, że zakładanie jego poprawności nie jest do końca słuszne.

Uzyskane wyniki można przedstawić jeszcze w inny sposób. Uzyskuje się dzięki temu rozkład zbliżony do rozkładu Poissona (rys. 14):



Rys. 14 Rozkład wyników z Rys. 13 dla odpowiedniej zależności. [12]

Również na jego podstawie można dojść do podobnych wniosków. Maksimum, czyli wartość oczekiwana, przypada na ryzyko raka równe 1, co jest zgodne z analizą bayesowską. Można też stwierdzić na podstawie analizy 28 badań, że najbardziej prawdopodobnym modelem jest model progowy, w którym poniżej 150 mSv na rok wykazano brak zależności ryzyka od dawki.

## 7. Problem z prowadzeniem badań na temat wpływu promieniowania na człowieka

Główną przeszkodą w uzyskaniu rzetelnych wyników przedstawiających skutki oddziaływania promieniowania jonizującego na człowieka jest sposób pozyskania danych. Nie można po prostu wziąć dużej grupy ludzi i poddać ich napromienieniu różnymi dawkami, aby zaobserwować skutki z tego płynące. Dodatkowym utrudnieniem jest czas – musi minąć wiele lat, aby można było stwierdzić, jakie dana dawka wywołała efekty. Z długim czasem trwania wiąże się natomiast kolejny problem – dany organizm podlega wielu innym szkodliwym wpływom pochodzącym nie tylko od promieniowania jonizującego. Należy więc to uwzględnić i filtrować uzyskane dane, aby nie wyciągnąć błędnych wniosków. Dla celów statystycznych obliczono, ile w sumie osób powinno zostać przebadanych, aby przy obecnej znajomości promieniowania jonizującego możliwe było znalezienie korelacji pomiędzy byciem narażonym na promieniowanie, a zachorowaniem na daną chorobę. Aby to osiągnąć przyjęto czas naświetlania równy 40 lat, oraz pominięto czynniki zbyt komplikujące stworzenie statystyki, takie jak np. wiek badanych osób [1]. W rzeczywistych badaniach należałoby jednak wszystkie takie zmienne uwzględnić. Wynik tej statystyki przedstawiono w tabeli 1:

Tabela 1 Wymagana liczba osób do badań. [1]

<b>Dawka łączna w okresie 40 lat [mSv]</b>	<b>Średnia dawka roczna [mSv]</b>	<b>Wymagana liczebność badanych</b>
40	1,0	1 809 000
80	2,0	454 500
120	3,0	200 300
240	6,0	51 500
400	10,0	18 090
800	20,0	4 545
2000	50,0	900

Jak widać, niezwykle trudne jest uzyskanie wiarygodnych wyników badań w obszarze niskich dawek, ze względu na liczebność grup badanych i kontrolnych. Grupy owe nie mogą do tego być przypadkowe i opierać się jedynie na ilości osób. Statystyka taka powinna uwzględniać dodatkowo takie zmienne jak:

- wiek,
- płeć,
- predyspozycje genetyczne,
- narażenie na czynniki mogące wywołać podobne skutki chorobowe,

- obniżająca się odporność organizmu wraz z wiekiem,
- nawyki,
- miejsce zamieszkania,
- warunki życia,
- i inne.

Głównym problemem chorobowym będącym skutkiem promieniowania są nowotwory. Jednakże kwestia ta jest bardziej skomplikowana niż się wydaje – aby do jego powstania doszło musi minąć odpowiednio długi czas, co dla celów statystycznych znacznie utrudnia proces badania. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że nie sposób definitywnie stwierdzić, czy dany nowotwór jest efektem działania jonizacji, czy innych czynników kancerogennych (np. palenia papierosów). Obarcza to każde badania dużą niepewnością, gdyż uzyskana korelacja między chorobą a daną przyczyną może być przypadkowa, jeżeli w danej analizie nie uwzględniono istotnych czynników zakłócających. Badania takie wymagają niezwyklej ostrożności, gdyż łatwo w nich może dojść do poważnego błędu [1].

Ze względu na takie trudności w zdobywaniu nowego materiału do badań wiele analiz prowadzonych jest na podstawie większych zdarzeń radiacyjnych, które miały na świecie już miejsce. Dane te są gromadzone przez takie instytucje jak Komitet Naukowy Narodów Zjednoczonych ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR) czy przez amerykańską organizację Radiation, Science and Health. Zgromadzone wyniki wielu różnych sposobów ekspozycji można przedstawić w następującej tabeli 2:

Tabela 2. Dane na podstawie których wnioskuje się o skutkach promieniowania.[1]

<b>Źródło ekspozycji</b>	<b>Rodzaj narażenia lub badanej grupy</b>	<b>Liczba przebadanych osób</b>
Bombardowania i opad promieniotwórczy po wybuchach jądrowych	Ocalałe ofiary w Japonii	86 572
	Wyspiarze z Wysp Marshalla	2 273
	Semipałatyńsk/Ałtaj (b. ZSRR)	30 000
Radioterapia	Miednica	193 108
	Kręgosłup	13 914
	Skóra głowy	27 000
	Pierś	4 215
	Procedury z użyciem radu-224	3 938
	Diagnostyka i leczenia jodem-131	55 619
Medyczne badania rentgenowskie	Fluoroskopia (klatki piersiowej u gruźlików)	77 557
	Badania prenatalne	44 616
	Korzystanie z kontrastu torowego	11 150
Narażenie zawodowe	Wydobycie uranu	64 479
	Stosowanie farb radowych	3 746
	Przemysł jądrowy (Japonia, Wielka Brytania, USA, Kanada)	210 573
Zanieczyszczenia środowiska	Mieszkańcy okolic rzeki Tieczy (b. ZSRR)	26 485
Promieniowanie naturalne	Mieszkańcy obszarów o wysokim poziomie promieniowania (Chiny, Indie)	106 000
	Radon w kopalniach żelaza i cyny	3 829

W tabeli 2 przedstawiono liczbę osób do tej pory objętych badaniami, na podstawie których mówi się o ryzyku związanym z promieniowaniem (te dane są najczęściej analizowane przez kolejne grupy badaczy). Należy jednak zwrócić uwagę, że przedstawione dane odnoszą się głównie do skutków śmiertelnych zdarzeń radiacyjnych, a nie do zapadalności na choroby popromienne, niekończące się śmiercią poszkodowanego.

## **8. Aktualny stan poglądów na relacje pomiędzy hipotezą liniową, a hipotezą hormetyczną**

Przyjęta w 1959 roku przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej hipoteza liniowa miała być początkowo jedynie roboczym założeniem. Pomimo wielu badań, które wskazują na jej błędność nadal przyjmowana jest za fakt naukowy i na jej podstawie wciąż tworzone są zasady ochrony radiologicznej. Jednym z wielu momentów, w których zwracano uwagę na jej bezpodstawność była katastrofa w Czarnobylu. W związku z tą tragedią przesiedlono około 400 tys.

osób, co skutkowało masowym obniżeniem długości życia wywołanym stresem i pogorszeniem jego jakości, nie wspominając już o olbrzymich stratach ekonomicznych. Dodatkowo nie stwierdzono wzrostu śmiertelności spowodowanego promieniowaniem wynikającym z tej katastrofy. Innym dowodem, uzyskanym stosunkowo niedawno, jest badanie nad stochastycznym modelem odpowiedzi komórek na promieniowanie, przeprowadzane przez K. Fornalskiego i współpracowników w 2011 roku [4][11]. Opierając się na technice modelowania Monte Carlo zaprojektowano model algorytmu, który opisuje biologię i fizykę wirtualnej komórki. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że stosowanie układów liniowych – w tym hipotezy liniowej – w kontekście organizmów jest błędne.

Pewnym przełomem w dziedzinie badań nad hormezą radiacyjną jest opublikowany w 1994 roku raport UNSCEAR [13], w którym dokonano przeglądu najważniejszych prac z tym związanych, w celu wyjaśnienia biologicznych mechanizmów hormezy. Wywołało to lawinę artykułów krytykujących przyjętą hipotezę liniową. Już kilka lat temu istniało ponad trzy tysiące publikacji, przedstawiających pozytywne dla zdrowia skutki promieniowania jonizującego i nadal powstają nowe.

Kolejny krok w kierunku wyjaśnienia tego sporu podjął prof. Edward Calabrese, który w 2008 roku założył stworzyszenie Internation Dose-Responde Society, zajmujące się tematyką niskich dawek [4][6]. Coraz więcej badań epidemiologicznych dowodzi błędności hipotezy liniowej, wskazując na hormezę radiacyjną, jako teorię o wiele bardziej prawdopodobną.

Jedno z wielu badań przeprowadzono m. in. w Oak Ridge National Laboratory w USA, na pracownikach laboratoriów jądrowych [5]. Analiza wyników badań na 14 tysiącach osób w latach 1943-72 przyniosła następujące zależności:

- na każde pochłonięte 10 mSv promieniowania przez osoby po 45 roku życia następuje 5 % wzrost zachorowań na nowotwory po 10 latach i 7% po 20 latach bycia narażonym na promieniowanie,
- u osób narażonych na napromienienie przed 45 rokiem życia stwierdzono zmniejszenie się liczby zgonów po 10 latach o 0,7% i wzrost ich liczby pod 20 latach o 0,24%.

Zauważono, że badana ludność prezentowała przeciętnie lepszy stan zdrowia niż ogół ludzi w USA, aczkolwiek statystycznie zaobserwowano większą zachorowalność na białaczkę.

Dodatkowo, zauważyć można, że pomiędzy 40 a 55 rokiem życia pojawia się osłabienie odporności na promieniowanie.

Również i w Polsce przeprowadzono podobne badania, w Świerku [5]. Zbadano dawki, na jakie narażeni są pracownicy oraz występujące u nich choroby nowotworowe. Przebadano dane ponad czterech tysięcy pracowników w ciągu 45 lat (1956-2001). Na podstawie uzyskanych wyników zauważono nieznaczny spadek zachorowalności na nowotwory. Jako ciekawostkę można zauważyć,



że wśród osób, które otrzymały dawkę skuteczną większą niż 35 mSv nie zarejestrowano przypadku zachorowania na choroby nowotworowe.

## **9. Miejsca na świecie z podwyższonym/obniżonym tłem**

W wielu rejonach świata dawka promieniowania pochodząca od tła różni się w sposób znaczący. Uniemożliwia to na chwilę obecną ujednoczenie badań na tym podłożu, a także przeczy wielu obserwacjom wynikającym z założenia hipotezy liniowej, ze względu na to, że u ludności mieszkającej na terenach o wyższym promieniowaniu nie stwierdzono zwiększonej zachorowalności na nowotwory czy inne choroby z tego powodu wynikające. Podwyższone tło promieniowania naturalnego stwierdzono dla takich miejsc, jak:

- prowincja Yangjing, Chiny – 6,4 mSv/rok,
- Kerala, Indie – do 35 mSv na rok,
- Guarapari, Brazylia – do 175 mSv na rok,
- inne rejony Brazylii – do 30 mSv na rok,
- Ramsar, Iran – do 260 mSv na rok [4].

Dla porównania w Polsce promieniowanie tła wynosi około 2,5 mSv na rok [11]. Jak widać rozbieżność jest znacząca, przez co ustalenie maksymalnej dopuszczalnej dawki dla ogółu ludności na wysokości 1 mSv wydaje się co najmniej nieodpowiednie.

## **10. Wnioski**

Na podstawie wielu przeprowadzonych badań można dojść do wniosku, że używanie wysokich dawek do przewidywania skutków dawek niskich jest metodą niepoprawną. Obecnie na świecie wciąż trwa spór, która z hipotez jest tą właściwą. Coraz częściej nie wyklucza się już możliwości działania dawek dopiero powyżej pewnego progu, a przyjęte w ochronie radiologicznej założenie, że dawka jest zawsze szkodliwa wydaje się mieć raczej charakter zachowawczy. Prowadzi to do przeszacowania wielkości ryzyka, zgodnie z zasadami ALARA (as low as reasonably achievable) i zasady pesymizacji. Problem stwarza jednak rzetelne wyjaśnienie zjawisk zachodzących przy niskich dawkach, ze względu na brak odpowiednich danych do przeanalizowania. Jediną możliwą

metodą prowadzenia badań jest przeprowadzanie eksperymentów na zwierzętach, roślinach i innych materiałach biologicznych, a także badanie obszarów o podwyższonym tle, w których żyje duża populacja ludzi, czy też badania na ludziach, którzy zawodowo mają kontakt z źródłami promieniotwórczymi.

Gdyby jednak pewnego dnia nastąpiło odejście od hipotezy liniowej bezprogowej i przyjęcie teorii hormezy, jako tej znacznie lepiej opisującej mechanizmy oddziaływania promieniowania z organizmami żywymi zmieniłoby to podejście do kwestii ochrony radiologicznej. Możliwe, że przyczyniłoby się również do rozwoju terapii z wykorzystaniem małych dawek. Hipoteza hormezy znacznie lepiej opisuje mechanizmy, które zauważono w organizmach już dużo wcześniej – zdolność do naprawiania olbrzymich, codziennych ilości uszkodzeń DNA z wielu źródeł. Nie należy jednak popadać w nadmierny entuzjazm, gdyż nawet ta zdolność przegra walkę ze zbyt dużą dawką promieniowania i organizm nie będzie w stanie na czas naprawiać powstających uszkodzeń. Skutki popromienne zależą od wielu czynników, co na chwilę obecną utrudnia jednoznaczne wydanie werdyktu na temat słuszności którejś z teorii.

Warto też zauważyć, że wyjątkowo niskie progi dopuszczalnych dawek nie wynikają z ryzyka zachorowania, ale z powodów psychologiczno-socjologicznych. Dlatego też, nawet jeżeli udałoby się znaleźć złoty środek we wszystkich powstałych teoriach i okazałoby się, że wartość minimalnego dopuszczalnego poziomu promieniowania została znacznie zaniżona to naukowców nadal czekać będzie dużo pracy podczas przekonowywania społeczeństwa, że promieniowanie nie jest jedynie czymś szkodliwym czego należy się bezwzględnie i zawsze bać.

## 11. Bibliografia

- [1] L. Dobrzyński, W. Trojanowski, „Działanie promieniowania jonizującego na organizmy. Ryzyko związane z promieniowaniem.”, Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu w Białymstoku oraz Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, Otwock-Świerk
- [2] L. Dobrzyński, „Biologiczne skutki promieniowania jonizującego”, Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, Otwock-Świerk
- [3] L. Dobrzyński, „Hormeza – zjawisko powszechne i powszechnie nieznanne”, Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu w Białymstoku oraz Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, Otwock-Świerk
- [4] L. Dobrzyński, „O biologicznych skutkach promieniowania jonizującego”, raport nr 13 działu szkolenia i doradztwa, Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, Otwock-Świerk
- [5] A. Kraska, B. Bilski, „Narażenie pracowników ochrony zdrowia na promieniowanie jonizujące, a hipoteza hormezy radiacyjnej”, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi, 2012 r.
- [6] J. Naniewicz, „Wpływ elektrowni jądrowych w czasie normalnej pracy na zdrowie ludzi i środowisko”, Centrum Onkologii, Warszawa
- [7] J. Naniewicz, „Naturalne tło promieniowania i inne źródła – percepcja ryzyka”, Instytut Hematologii i Transfuzjologii, Warszawa
- [8] „Radioterapia”, Katedra Onkologii Akademii Medycznej, Wrocław, 2008 r.
- [9] M. Tylkowski, M. Kośmider, „Bezpieczeństwo radiologiczne w pracowni hemodynamiki”, Pracownia Hemodynamiki Zakładu Onkologii Inwazyjnej Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego nr 3, Łódź
- [10] K. W. Fornalski, L. Dobrzyński, „Problem niskich dawek promieniowania, a sprawa radonu”, Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu w Białymstoku oraz Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, Otwock-Świerk

[11] Dane ze strony Ministerstwa Gospodarki, dotyczące Promieniowania Jonizującego i Promieniowania Tła, data ostatniej aktualizacji: 2014-08-19

[12] A. Strupczewski, „Czy zaszkodzi nam promieniowanie przy normalnej pracy elektrowni jądrowej?”, Instytut Energii Atomowej – POLATOM, „Energetyka Ciepła i Zawodowa” - nr 6/2009