

CO JEST PRZYCZYNĄ BIAŁACZEK U DZIECI MIESZKAJĄCYCH W POBLIŻU ELEKTROWNI JĄDROWYCH?¹

Marek K. Janiak²

Streszczenie: W latach 1980-tych pojawiły się doniesienia o występowaniu skupisk zachorowań na białaczkę u dzieci mieszkających w pobliżu elektrowni atomowych i innych obiektów jądrowych. Niniejszy artykuł dokonuje przeglądu takich skupisk występujących w Niemczech, W. Brytanii, Francji i innych krajach i analizuje potencjalny związek między promieniowaniem emitowanym przez obiekty jądrowe a zachorowaniami na białaczkę. Ponieważ wykazano, że poziom promieniowania jonizującego na terenach wokół elektrowni i innych instalacji jądrowych nie stanowi zagrożenia dla zdrowia i życia mieszkających w pobliżu ludzi najbardziej prawdopodobną przyczyną okazał się być brak wystarczającej odporności u dzieci tych mieszkańców na wirusy i inne patogeny pojawiające na terenach budowy zakładów jądrowych wraz z napływającymi z odległych miejsc nowymi pracownikami tych zakładów.

Białaczka jest złośliwym nowotworem układu krwiotwórczego charakteryzującym się nadmierną produkcją niedojrzałych krwinek białych, czyli leukocytów (stąd łacińska i angielska nazwa choroby *leukaemia*). Białaczka może mieć charakter ostry lub przewlekły i, w zależności od tego jakich komórek dotyczy, dzieli się na białaczkę mieloblastyczną (szpikową) i limfoblastyczną (limfocytową). Białaczki, przede wszystkim ostra białaczka limfoblastyczna i ostra białaczka szpikowa, są najczęściej rozpoznawanymi nowotworami złośliwymi u dzieci [1-3]. Przyczyny białaczek nie są dobrze poznane, ale wiadomo że jej rozwój może mieć podłoże genetyczne, a także być wynikiem działania wirusów i innych czynników rakotwórczych, w tym odpowiednio wysokich dawek promieniowania jonizującego i niejonizującego [4].

¹ Artykuł jest autorską wersją publikacji w języku angielskim: Janiak M.K. *Epidemiological evidence of childhood leukaemia around nuclear power plants*, Dose Response 12(3): 349-364, 2014. doi: 10.2203/dose-response.14-005.Janiak.

² Autor jest zastępcą Przedstawiciela Polski w Komitecie Naukowym ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR) oraz członkiem Rady ds. Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej przy Prezesie PAA; w latach 1997-2020 kierował Zakładem Radiobiologii i Ochrony Radiacyjnej Wojskowego Instytutu Higieny i Epidemiologii; obecnie na emeryturze.

W epidemiologii występowanie chorób w danej populacji mierzy się za pomocą współczynników zachorowalności (i/lub śmiertelności), czyli stosunku liczby nowych zachorowań (zgonów) do liczby ludności narażonej na zachorowanie/śmierć. Aby możliwe było porównywanie tych współczynników w różnych populacjach i w różnym czasie stosuje się tzw. standaryzowane współczynniki zachorowalności (SWZ) lub śmiertelności (SWŚ), które są ilorazem liczby zachorowań/zgonów obserwowanych w danej populacji do liczby zachorowań/zgonów „oczekiwanych” w odpowiedniej populacji „standardowej”. Jeśli więc SWZ/SWŚ jest większy od 1 znaczy to, że liczba faktycznych zachorowań/zgonów jest większa niż „powinna” wystąpić w danej populacji. Znamienność statystyczną takiego wyniku określa tzw. przedział ufności (ang. *confidence interval*, CI), którego, aby wynik był znamieny, dolna granica powinna być większa od jedności [5].

Pracownicy elektrowni jądrowej (EJ) oraz, w mniejszym stopniu, okoliczna ludność eksponowani są na działanie uwalnianego z reaktora atomowego elektromagnetycznego promieniowania jonizującego (gamma i beta), a także niejonizujących pól elektromagnetycznych linii przesyłowych wysokiego napięcia znajdujących się wokół każdej EJ. Jak wiadomo, pochłonięcie odpowiednio wysokich dawek promieniowania jonizującego może prowadzić do rozwoju nowotworów [6-9]. Jednym najbardziej typowych nowotworów popromiennych, które pojawiają się najszybciej (już po ok. 2 latach) po ekspozycji na promieniowanie są białaczki [8,10-12]. Uważa się też, że pola magnetyczne, jakie występują przy generacji i przesyłaniu prądu elektrycznego, mogą wywoływać białaczki u dzieci [4].

Dawka promieniowania jonizującego uwalnianego z EJ w ciągu roku wynosi od 0,0001 do 0,007 mSv [13,14], co stanowi znikomą część średniej rocznej dawki promieniowania naturalnego (1-3 mSv/rok) pochłanianego przez człowieka na Ziemi. Pomimo tego, istnieje przekonanie, podsycane przez różne grupy tzw. ekologów, a także – niestety – niektórych naukowców, że dłuższe przebywanie w pobliżu EJ może być przyczyną różnych chorób, a nawet śmierci [15-17].

Produkcja energii w elektrowniach atomowych wzbudzała obawy społeczne od czasu uruchomienia w latach 1950-tych pierwszych EJ w USA, ZSRR i W. Brytanii. Problem wpływu tych elektrowni na zdrowie ludzi, szczególnie na rozwój nowotworów złośliwych, zaczął być analizowany jednak dopiero w latach 1980-tych [18]. W roku 1983 reporterzy telewizji w Yorkshire (W. Brytania) donieśli o siedmiu przypadkach białaczki wykrytej u ludzi poniżej 25 lat, którzy od roku 1955 mieszkali w Seascale, miasteczku w Cumbrii oddalonym o ok. 5 km od Sellafield - głównego brytyjskiego ośrodka przerobu i magazynowania paliwa jądrowego [19]. Wykrycie tego „ogniska w Seascale” (*Seascale*

cluster) stało się sensacją, ponieważ – wg dotychczasowych statystyk – w tym czasie liczba nowo wykrytych zachorowań na białaczkę wśród młodych ludzi nie powinna przekroczyć jedności [20]. Niedługo potem, w Thurso, małym mieście na północnym wybrzeżu Szkocji, 12,5 km od działającej od połowy XX wieku EJ w Douneray, wykryto pięć przypadków białaczki u ludzi poniżej 24 roku życia (trzy z nich dotyczyły dzieci poniżej 4 r.ż.) [21]. Trzecie doniesienie pochodziło z Niemiec, gdzie w na początku lat 1990-tych wykryto 5 przypadków ostrej białaczki u dzieci poniżej 10 roku życia, które w latach 1989-1996 mieszkały na terenie gminy Elbmarsch w promieniu ok. 5 km od EJ w Krümmel (*Kernkraftwerk Krümmel*, KKK), wykorzystującej największy wówczas na świecie reaktor wrzący ulokowany na Łabie ok. 35 km na wschód od Hamburga [22,23]. Hoffmann i współpracownicy przeanalizowali przypadki białaczek wykrywanych w latach 1990-2005 u dzieci mieszkających nie dalej niż 5 km of KKK, i stwierdzili statystycznie znamienne wzrost zachorowalności, szczególnie u dzieci poniżej 4 roku życia (SWZ = 4,9; CI = 2,4-9,0) [24]. Schmitz-Feuerhake i jej współpracownicy zasugerowali, że wysoka zachorowalność dzieci na białaczkę w gminie Elbmarsch była wywołana przez radionuklidy uwolnione w czasie awarii instalacji jądrowej przylegającej do KKK, jaka wystąpiła w roku 1986 [25]. Wcześniejszy nieco raport ekspertów z Komitetu Schleswig-Holstein także wskazywał, że promieniowanie emitowane w czasie tego wypadku mogło być przyczyną zwiększonej zachorowalności dzieci na białaczkę [26]. Jednakże, jak wykazali Hoffmann i współpracownicy, awaria instalacji jądrowej przylegającej do KKK, która nie mogła przejść niezauważona, nie była przedmiotem żadnych działań ze strony władz Dolnej Saksonii, gdzie znajduje się gmina Elbmarsch [24]. Faktycznie, specjalna komisja powołana przez te władze stwierdziła, że w czasie normalnego funkcjonowania instalacji nuklearnych w Elbmarsch nie da się wykryć żadnego związku między zachorowaniami dzieci na białaczkę a emisją promieniowania jonizującego i że nie wszystkie lokalnie występujące czynniki ryzyka zachorowania zostały zidentyfikowane [27].

W roku 1990 publikacja w prestiżowym *British Medical Journal* informowała o wzroście zachorowalności na białaczki w regionie Nord Cotenin w Normandii: w latach 1978-1990 wykryto tam 23 przypadki zachorowań u ludzi do 25. r.ż. mieszkających w promieniu 35 km od trzeciego co do wielkości na świecie zakładu przerobu paliwa jądrowego w La Hague (SWZ = 2,99) i 3 przypadki zachorowań na białaczkę u młodych mieszkańców kantonu Flamanville, gdzie znajdowała się EJ [28]. Późniejsze analizy tych zachorowań wykazały jednak, że w większości przypadków ich zwiększona częstość nie była istotna statystycznie [29,30].

Mimo znanego faktu, że skupiska (klastry) białaczki dziecięcej występują w sposób przypadkowy w czasie i przestrzeni [31-34], ww. doniesienia wzbudziły zrozumiane zaniepokojenie wśród lekarzy i ogółu społeczeństwa. Postanowiono więc bliżej przyjrzeć się tym zachorowaniom.

Raporty na temat białaczek diagnozowanych u dzieci z okolic instalacji jądrowych w Sellafield, Dounreay i gminie Elbmarsch były wynikiem tzw. opisowych badań ekologicznych (geograficznych), które korelują występowanie jakiegoś czynnika ryzyka (w tym przypadku, ekspozycji na promieniowanie jonizujące) z potencjalnym skutkiem działania tego czynnika (w tym przypadku, zachorowaniem na białaczkę) w danym okresie na danym obszarze geograficznym. Wyniki badań ekologicznych umożliwiają stawianie *hipotez* badawczych (w tym przypadku, istnienia związku między działaniem promieniowania a zachorowaniem na białaczkę), ale nie pozwalają na wykrywanie *zależności przyczynowo-skutkowych*, ponieważ nie dostarczają informacji czy, w naszym przypadku, chorzy z wykrytą białaczką byli rzeczywiście wcześniej poddani działaniu promieniowania, a jeśli tak to w jakim stopniu [5]. Zależność taką dokumentować mogą bardziej „wyrafinowane” analizy epidemiologiczne, takie jak badania „kohortowe” i badania typu „przypadek-kontrola” [5,35]. Prawdopodobieństwo istnienia badanego związku między (potencjalną) przyczyną a obserwowanym skutkiem określają uzyskiwane w tych badaniach wskaźniki, do których zaliczamy ryzyko względne (*relative risk*, RR^3), nadmiarowe ryzyko względne (*excess relative risk*, ERR^3) oraz iloraz szans (*odds ratio*, OR^3).

Dla określenia związku przyczynowo-skutkowego między działaniem promieniowania jonizującego a występowaniem chorób (przede wszystkim białaczek, ale także chłoniaków i innych nowotworów) w latach 1990-tych opublikowano wyniki wielu badań analitycznych

³ **Ryzyko względne** (ang. *relative risk* lub *risk ratio*, RR) jest stosunkiem ryzyka (prawdopodobieństwa) zachorowania/zgonu w grupie osób eksponowanych na działanie czynnika ryzyka do takiego samego ryzyka występującego w grupie osób nienarażonych na działanie danego czynnika ryzyka: $RR = \text{ryzyko w grupie eksponowanej} / \text{ryzyko w grupie nieeksponowanej}$. $RR = 1$ oznacza takie samo ryzyko w grupie eksponowanej i nieeksponowanej na czynnik ryzyka. **Nadmiarowe ryzyko względne** (ang. *excess relative risk*, ERR) oblicza się przez odjęcie jedności od ryzyka względnego, czyli $ERR = RR - 1$. RR i ERR obliczane są w badaniach kohortowych. **Iloraz szans** (ang. *odds ratio*, OR) jest stosunkiem „szansy” (prawdopodobieństwa) narażenia grupy chorych na dany czynnik chorobotwórczy do takiej samej „szansy” u grupy osób zdrowych. $OR = 1$ oznacza, że szanse narażenia na czynnik chorobotwórczy są takie same w grupie chorych i w grupie zdrowych. OR może być równoważny RR jeśli ryzyko zachorowania (na określoną chorobę) w danej populacji jest niskie. Ten wskaźnik obliczany jest w analizach epidemiologicznych typu „przypadek-kontrola” [Jekel i wsp. 2001 - 5].

(kohortowych i/lub typu „przypadek kontrola”) przeprowadzonych w Anglii, Kanadzie, Francji, Niemczech i Szkocji [przeгляд tych badań w: 35,36]. Uzyskane wyniki nie były zgodne: niektóre sugerowały istnienie statystycznie znamiennego związku pomiędzy odległością od instalacji nuklearnej, w jakiej zamieszkiwały dzieci, a wystąpieniem choroby, inne nie wykryły żadnej takiej zależności [15,35]. Niektórzy badacze analizujący „ognisko w Seascale”, zasugerowali, że białaczki te wynikały z pochłonięcia promieniowania przez ojców chorych dzieci w czasie ich pracy przy instalacjach nuklearnych przed narodzeniem się ich potomstwa [37,38].

W tej sytuacji, rządy Francji, Niemiec i W. Brytanii poprosiły ekspertów o przeprowadzenie bardziej wnikliwych analiz. I tak, brytyjski Komitet COMARE (*Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment*) stwierdził w raporcie z 1996 roku, że poziom promieniowania wokół Sellafield był co najmniej 200 razy za niski, aby doprowadzić do powstania „ogniska w Seascale” [39]. W późniejszym raporcie z roku 2006 Komitet COMARE zaznaczył, że białaczki dziecięce, szczególnie ostra białaczka limfocytowa, mają trudną do wyjaśnienia tendencję do tworzenia „klastrow” w czasie i przestrzeni i że nie ma przekonujących dowodów na to, aby skupiska białaczki i innych nowotworów u dzieci zamieszkujących tereny wokół brytyjskich instalacji nuklearnych były wywołane działaniem promieniowania jonizującego emitowanego przez te instalacje [40]. W Niemczech, od roku 2002 prowadzono analizy typu „przypadek-kontrola” w celu wykrycia przyczyn zachorowań na białaczki u młodych ludzi żyjących w latach 1980-2003 w pobliżu szesnastu niemieckich EJ. Analizy te, znane jako „badanie KiKK” (*Krebs bei Kindern in der Umgebung von Kernkraftwerken* – rak u dzieci z okolic EJ) objęły prawie 1600 chorych dzieci („przypadków”) zamieszkujących w promieniu do 10 km od EJ i ponad 4700 odpowiednio dobranych „kontroli” – dzieci z okolic nie sąsiadujących z instalacjami nuklearnymi. Wyniki tych badań wykazały, że przebywanie przez pierwsze 5 lat życia w odległości do 10 km od EJ wiąże się ze zwiększonym ryzykiem zachorowania na nowotwór, zwłaszcza białaczkę: wyliczony iloraz szans (OR) w tych badaniach wynosił od 1,12 do 2,19 [41,42]. Jednakże, wartości SWZ wyliczone przez tych samych badaczy nie były statystycznie [43]. Niewątpliwymi zaletami „badania KiKK” była wyjątkowo duża liczba zachorowań u dzieci pochodzących z okolic wszystkich niemieckich EJ (37 chorych do 5 r.ż. mieszkających w promieniu 5 km od EJ wśród ogółem 593 przypadków białaczki wykrytych w 24-letnim okresie badawczym) oraz określenie odległości od miejsca zamieszkania każdego chorego dziecka do najbliższej EJ (czego nie definiowały wcześniej przeprowadzone obserwacje ekologiczne). Jak jednak zauważyli sami autorzy, badanie to miało też poważne wady co

prowadziło do wniosku, że „nie można wykluczyć, iż uzyskane wyniki są wynikiem nieuwzględnionych czynników zakłócających lub czystego przypadku” [41,42].

Wyniki „badania KiKK” nie znalazły zresztą poparcia w innych szeroko zakrojonych analizach. Na przykład, Dominique Laurier i Denis Bard dokonali w roku 1999 przeglądu wcześniej przeprowadzonych 29 lokalnych i 14 szerzej zakrojonych obserwacji ekologicznych i badań typu „przypadek-kontrola” zachorowań na białaczkę wśród dzieci żyjących w pobliżu instalacji nuklearnych [35]. Okazało się, że jakkolwiek obserwacje ekologiczne wykazały obecność skupisk białaczki dziecięcej wokół niektórych instalacji, nie było to regułą i podobne skupiska występowały też daleko od takich instalacji, a także że analizy typu „przypadek-kontrola” mające wykryć przyczynę takich skupisk nie dały jednoznacznych wyników, pozwoliły natomiast wyeliminować takie hipotezy jak napromienienie ojców (przed dokonaniem przez nich zapłodnienia) lub działanie promieniowania naturalnego. Późniejsze analizy zachorowań na białaczkę wśród dzieci z okolic aż 198 zakładów nuklearnych z 10 krajów przeprowadzone przez Laurier i jej kolegów wykazały, że choć lokalnie występowały skupiska tej choroby, ryzyko zachorowania nie było zwiększone jeśli brano pod uwagę większe obszary badawcze [44]. Badacze ci stwierdzili, że główną przeszkodą w wyjaśnieniu genezy skupisk zachorowań lokalnych jest brak danych co do faktycznych czynników ryzyka białaczki dziecięcej i że najbardziej prawdopodobna jest hipoteza „mieszania się” ludności (*population mixing*), do jakiego dochodzi na terenach wokół instalacji jądrowych (patrz niżej). Co ciekawe, nawet tzw. „niezależni” (od przemysłu jądrowego) badacze, którzy uważają że występowanie nowotworów u dzieci i młodzieży z okolic zakładów jądrowych spowodowane jest działaniem emitowanego promieniowania jonizującego, przyznają że wyniki „znacznej większości” badań epidemiologicznych wykazujących wzrost zachorowań nie mają znamienności statystycznej [16,17]. Istotnie, brak wyraźnie (jeśli w ogóle) zwiększonego ryzyka zachorowania na białaczkę u dzieci z okolic zakładów nuklearnych wykazano w wielu publikacjach wyników badań przeprowadzonych w latach 1991-2008 w Izraelu [45], USA [46,47], Szwecji [48], Niemczech [49], Japonii [50] i Francji [51]. Także późniejsze ogólnokrajowe badanie kohortowe pochodzące ze Szwajcarii [52], kolejny raport Komitetu COMARE z W. Brytanii [53], analiza typu „przypadek-kontrola” przeprowadzona we Francji [54], a także szeroko zakrojona obserwacja ekologiczna z Kanady [14] nie wykazały związku pomiędzy zamieszkiwaniem w pobliżu EJ a zwiększonym ryzykiem zachorowania przez dzieci na białaczkę lub inny nowotwór złośliwy. Co ciekawe, ta ostatnia obserwacja pokazała, że zapadalność na wszystkie nowotwory złośliwe, w tym wywoływane przez promieniowanie jonizujące, u dzieci z okolic trzech EJ w

provincji Ontario jest nawet nieco niższa od częstości zachorowań obserwowanej w całej populacji dzieci z Ontario. W dodatku, Lane i koledzy zauważyli że ekspozycja dzieci na promieniowanie *zwiększała się*, a nie zmniejszała, wraz ze wzrostem odległości od EJ, co podaje w wątpliwość wyniki wielu przeprowadzonych wcześniej badań, w których dystans do instalacji jądrowej stanowił „odpowiednik” dawki pochłoniętej [14].

Są także ciekawe wyniki badań amerykańskich i brytyjskich, w których analizowano zachorowania na białaczkę dziecięcą w tych samych rejonach przed i po uruchomieniu na ich terenie instalacji jądrowych. I tak, Jablon i współpracownicy stwierdzili, że na terenach wokół 62 takich instalacji w USA śmiertelność dzieci z powodu białaczki była niższa po ($SWS = 1,03$) niż przed ($SWS = 1,08$) uruchomieniem tych instalacji [46]. Podobne wyniki uzyskano w Anglii i Walii: nadmiarowe ryzyko zgonu z powodu białaczki i innych nowotworów w regionach, w których już znajdowały się instalacje jądrowe było takie samo jak w regionach gdzie dopiero planowano budowę takich instalacji [55]. Także 14. Raport Komitetu COMARE wykazał, że ryzyko względne (RR) zachorowania na białaczkę lub chłoniaka ziarniczego u dzieci mieszkających do 4. r.ż. w rejonach wokół 13 brytyjskich EJ miało wartość równą 1,01, podczas gdy w sześciu podobnych okolicach nieposiadających EJ to ryzyko wynosiło 1,72 [53].

Z ww. przeglądu wiarygodnych danych wynika więc, że występowanie skupisk białaczek dziecięcych potwierdzono jedynie w okolicach instalacji jądrowych w Sellafield w Anglii, w Dounreay w Szkocji oraz w Krümmel w Niemczech [14]. Skoro jednak, jak wielokrotnie wskazywano, ekspozycja na promieniowanie jonizujące nie mogła być w tych przypadkach przyczyną zachorowań nadal szukano możliwej przyczyny. Brano pod uwagę takie potencjalne czynniki takie jak predyspozycja genetyczna [56,57], działanie czynników uszkodzających chromosomy, tytoniu, pestycydów, leków i wirusów [10,12,57-60], trisomia 21 (jako przyczyna prawie wszystkich przypadków zespołu Downa, który predestynuje do rozwoju białaczki u dzieci) [61], wysoki status społeczny [12,62] oraz zaburzenie funkcji układu odpornościowego [63]. Jednak, w 75-90% przypadków wykrytych białaczek, prawdziwy czynnik sprawczy pozostał nieznanym i wydaje się, że – aby doszło do zachorowania – musiało zadziałać kilka różnych czynników [12,57,63,64]. Sugerowano, że metabolizm i/lub usuwanie z organizmu toksyn środowiskowych jest u dzieci mniej wydajne niż u dorosłych i że istnieją krytyczne „okna czasowe”, w których czynniki chorobotwórcze działają u nich szczególnie skutecznie [2,64]. Jak już wspomniano, jedną z potencjalnych przyczyn skupiska białaczek w Seascale było napromieniowanie gonad zatrudnionych w zakładach jądrowych ojców chorych dzieci [37,38]. Bardziej szczegółowe analizy pozwoliły

jednak odrzucić tę hipotezę wskazując, że narażeni na działanie promieniowania ojcowie byli zatrudnieni w wielu różnych zakładach jądrowych w Anglii, a skupisko białaczek u ich dzieci wykryto jedynie w okolicy Seascale [65-69]. Wydaje się więc, że – jak już podkreślono – możliwą przyczyną ognisk zachorowań wykrytych w Seascale i innych miejscach jest niewyjaśniona „tendencja” białaczek do skupiania się w określonych miejscach i czasie [1,63].

Jeszcze bardziej prawdopodobną przyczynę tych ognisk zaproponował w 1988 roku Leo Kinlen, który analizował występowanie białaczki u młodych mieszkańców szkockiego miasteczka New Town of Glenrothes, gdzie na początku lat 1950-tych powstało nowe przemysłowe centrum Szkocji przyciągające licznych pracowników z innych części W. Brytanii [70]. Takie mieszanie się populacji (*population mixing*) sprzyja rozprzestrzenianiu się wśród miejscowej ludności czynników zakaźnych (wirusów, bakterii, pierwotniaków itp.) przywleczonych przez przybyszów. W tym przypadku, centrum przemysłowe powstało w terenie słabo zaludnionym, gdzie tzw. odporność stadna populacji na czynnik zakaźny – potencjalną przyczynę rozwoju białaczki – była niższa od przeciętnej krajowej [71]. Na tym terenie Kinley wykrył znamienne statystycznie wzrost liczby zachorowań na białaczkę u młodych ludzi, szczególnie dzieci do 5-go r.ż. (7 faktycznych przypadków zachorowań wobec 1,5 zachorowań „spodziewanych”) [70]. Sugestia, że *population mixing* jest istotną przyczyną rozwoju białaczki limfocytowej oraz chłoniaka ziarniczego u dzieci potwierdzona została w wielu późniejszych badaniach prowadzonych na Szetlandach i Orkadach [72,73] i w Cumbrii w W. Brytanii [74], a także w innych krajach [75]. Te obserwacje zgodne są z obecnie przyjętym poglądem, że spaczona reakcja immunologiczna na długotrwałą ekspozycję na czynnik zakaźny stanowi prawdopodobną przyczynę rozwoju nowotworu u dzieci podatnych na rozwój choroby [12]. Niewątpliwie, do przyjęcia tego stanowiska przyczynił się znany brytyjski epidemiolog, Sir Richard Doll, który już w 1999 roku stwierdził, że hipotezę Kinlena o *population mixing* jako przyczynie rozwoju białaczki limfocytowej u dzieci można uznać za udowodnioną [76].

Podsumowanie.

Większość wiarygodnych analiz epidemiologicznych wykazało, że poziom promieniowania jonizującego na terenach wokół EJ jest stanowczo za niski, aby mógł być wiązany z zachorowaniami młodych mieszkańców tych terenów na białaczki i inne nowotwory. Najbardziej prawdopodobną przyczyną występowania ognisk białaczek dziecięcych w pobliżu niektórych EJ jest przynoszenie przez napływających z odległych regionów przybyszów wirusów i innych czynników zakaźnych, na które miejscowa ludność

nie jest wystarczająco odporna. Ten i inne czynniki mogą być także podłożem znanego, choć słabo wyjaśnionego, zjawiska „skupiania się” przypadków zachorowań na białaczki w „przypadkowych” miejscach i czasie. Być może, bardziej szczegółowe badania dotyczące, np. znaczenia ekspozycji i reakcji organizmu na czynniki ryzyka w okresie płodowym i tuż po urodzeniu pozwolą zidentyfikować przyczyny zachorowań na białaczkę u dzieci. Już teraz jednak można stwierdzić, że długotrwałe przebywanie w pobliżu EJ w czasie jej normalnej pracy nie stawowi żadnego zagrożenia dla zdrowia. Potwierdzeniem tej tezy jest fakt, że nawet najpoważniejsza katastrofa w EJ z jaką mieliśmy do czynienia w roku 1986 w Czarnobylu, związana z masywnym uwolnieniem do środowiska wielu radionuklidów i rodzajów promieniowania jonizującego, nie spowodowała znaczącego wzrostu zachorowań na białaczki i inne nowotwory (z wyjątkiem raków tarczycy) wśród mieszkańców najbardziej skażonych terenów na Białorusi, Ukrainie i Rosji [9].

Cytowana literatura:

1. Kaatsch P, Sikora E, Pawelec G. Epidemiology and childhood cancer. *Cancer Treat Rev.* 2010;36:277–285. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
2. WHO 2010: Children’s Health and the Environment Annual Report – 2010. 2010. www.who.int/ceh/publications/ceh_annualreport_2010.pdf.
3. An Q, Fan C-H, Xu S-M. Recent perspectives of pediatric leukemia - an update. *Eur Rev Med Pharmacol Sci* 21(4 Suppl):31-36, 2017.
4. WHO 2002: Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields (IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks). Geneva: World Health Organisation. 2002, str. 332–333, 338. ISBN 978-92-832-1280-5
5. Jekel JF, Katz DL, Elmore JG. *Epidemiology, Biostatistics, and Preventive Medicine.* 2nd Edition. Saunders; Philadelphia: 2001. [[Google Scholar](#)]
6. Burkart W, Finch GL, Jung T. Quantifying health effects from the combined action of low-level radiation and other environmental agents: can new approaches solve the enigma? *Sci Total Environ.* 1997;205:51–70. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
7. Tubiana M. Radiation risks in perspective: radiation-induced cancer among cancer risks. *Radiat. Environ. Biophys.* 2000;39:3–16. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
8. UNSCEAR 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York: United Nations; 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report 2000. [[Google Scholar](#)]
9. UNSCEAR 2008: Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report 2008. New York: United Nations; 2008. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Vol. II Effects. [[Google Scholar](#)]
10. Doll R, Wakeford R. Risk of childhood cancer from fetal irradiation. *Br J Radiol.* 1997;70:130–139. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
11. BEIR VII 2006: Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation BEIR VII Phase 2. The National Academies Press; Washington D.C: 2006. [[Google Scholar](#)]
12. Rossig C, Juergens H. Aetiology of childhood acute leukaemias: Current status of knowledge. *Rad Prot Dos.* 2008;132:114–118. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

13. Strupczewski A. Nie bójmy się energii jądrowej. Rem Script, Warszawa, 2010
[[Google Scholar](#)]
14. Lane R, Dagher E, Burt J, Thompson PA. Radiation exposure and cancer incidence (1990 to 2008) around nuclear power plants in Ontario, Canada. *J Environ Prot.* 2013;4:888–913. [[Google Scholar](#)]
15. Nussbaum RH. Childhood leukemia and cancers near German nuclear reactors: Significance, context, and ramifications of recent studies. *Int J Environ Health.* 2009;15:318–323. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
16. Fairlie I, Körblein AA. Review of epidemiology studies of childhood leukemia near nuclear facilities: commentary on Laurier *et al.* *Radiat. Prot. Dosimetry.* 2010;138:194–195. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
17. Fairlie I. A hypothesis to explain childhood cancers near nuclear power plants. *J Environ Radiact.* 2013 doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.07.024. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
18. Black D. Investigation of the Possible Increased Incidence of Cancer in Cumbria Report of the Independent Advisory Group. HMSO; London: 1984. [[Google Scholar](#)]
19. Cutler J. Windscale, the Nuclear Laundry. 1983. Yorkshire Television.
20. Urquhart J, Palmer M, Cutler J. Cancer in Cumbria: the Windscale connection. *Lancet.* 1984;1:217–218. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
21. Heasman MA, Kemp IW, Urquhart JD, Black R. Childhood leukaemia in Northern Scotland. *Lancet.* 1986;1:266. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
22. Hoffmann W, Schmitz-Feuerhake I, Dieckmann H. A cluster of childhood leukemia near a nuclear reactor in Northern Germany. *Arch. Environ. Health.* 1997;52:275–280. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
23. Schmitz-Feuerhake I, Dannheim B, Heimers A, Oberhaimann B, Schröder H, Ziggel H. Leukemia in the proximity of a German boiling water reactor: Evidence of population exposure by chromosome studies and environmental radioactivity. *Environ Health Perspect.* 1997;105:1499–1504. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
24. Hoffmann W, Terschueren C, Richardson DB. Childhood leukemia in the vicinity of the Geesthacht nuclear establishment near Hamburg, Germany. *Environ Health Perspect.* 2007;115:947–952. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
25. Schmitz-Feuerhake I, Dieckmann H, Hoffmann W, Lengfelder E, Pflugbeil S, Stevenson AF. The Elbmarsch leukemia cluster: are there conceptual limitations in controlling emission from nuclear establishments in Germany? *Arch Environ Contam Toxicol.* 2005;49:589–600. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
26. Wassermann O, Dieckmann H, Schmitz-Feuerhake I, Kuni H, Scholz R, Lengfelder E. Childhood leukaemia in the proximity of the nuclear facilities of Geesthacht. Findings of the Expert Commission of the German Federal State of Schleswig-Holstein in the period 1993–2004 on the causes of the increased incidence. *Umwelt Medizin Gesellschaft.* 2004;18:32–34. (w jęz. niemieckim) [[Google Scholar](#)]
27. Wichmann E, Greiser E. Untersuchungsprogramm Leukämie in der Samtgemeinde Elbmarsch– Fragestellung, Ergebnisse, Beurteilungen–Expertkommission und Arbeitsgruppe Belastungsindikatoren. 2004. Niedersächsisches Ministerium für Soziales, Fraune, Familie und Gesundheit Hannover.
28. Viel J-F, Richardson ST. Childhood leukaemia around the La Hague nuclear waste reprocessing plant. *Br Med J.* 1990;300:580–581. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
29. Viel J-F, Richardson S, Danel P, Boutard P, Malet M, Barrelier P, Reman O, Carré A. Childhood leukemia incidence on the vicinity of La Hague nuclear-waste reprocessing facility (France) *Cancer Causes Control.* 1993;4:3410343. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

30. Viel J-F, Pobiél D, Carré A. Incidence of leukaemia in young people around the La Hague nuclear waste reprocessing plant : A sensitivity analysis. *Statist Med.* 1995;14:2459–2472. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
31. Petridou E, Revinthi K, Alexander FE, Haidas S, Kolioukas D, Kosmidis H, Piperopoulou F, Tzortzatos F, Trichopoulos D. Space-time clustering of childhood leukaemia in Greece: evidence supporting a viral aetiology. *Br J Cancer.* 1996;73:1278–1283. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
32. McNally RJQ, Alexander FE, Birch JM. Space-time clustering analyses of childhood acute lymphoblastic leukaemia by immunophenotype. *Br. J Cancer.* 2002;87:513–515. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
33. Bellec S, Hemon D, Rudant J, Goubin A, Clavel J. Spatial and space-time clustering of childhood leukaemia in France from 1990 to 2000: a nationwide study. *Br J Cancer.* 2006;94:763–770. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
34. Amin R, Bohnert A, Holmes L, Rajasekran A, Assanasen C. Epidemiologic mapping of Florida childhood cancer clusters. *Pediatr Blood Cancer.* 2010;54:511–518. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
35. Laurier D, Bard D. Epidemiologic studies of leukemia among persons under 25 years of age living near nuclear sites. *Epidemiol Rev.* 1999;21:188–206. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
36. Michaelis J, Keller B, Haaf G, Kaatsch P. Incidence of childhood malignancies in the vicinity of west German nuclear power plants. *Cancer Causes Control.* 1992;3:255–263. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
37. Gardner M, Snee MP, Hall AJ, Powell CA, Downes S, Terrell JD. Results of the case-control study of leukaemia and lymphoma among young people near Sellafield nuclear plant in West Cumbria. *Br Med J.* 1990;300:423–429. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
38. Gardner M. Father's occupational exposure to radiation and the raised level of childhood leukemia near the Sellafield nuclear plant. *Environ Health Perspect.* 1991;94:5–7. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
39. COMARE. Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment. 4th Report: The Incidence of Cancer and Leukaemia in Young People in the Vicinity of the Sellafield Site, West Cumbria: Further Studies and an Update of the Situation since the Publication of the Report of the Black Advisory Group in 1984. Department of Health; London, 1996. [[Google Scholar](#)]
40. COMARE. Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment. 11th Report: The Distribution of Childhood Leukaemia and Other Childhood Cancers in Great Britain 1969–1993. Health Protection Agency; London, 2006. [[Google Scholar](#)]
41. Kaatsch P, Spix C, Schultze-Rath R, Schmiedel S, Blettner M. Leukemia in young children living the vicinity of German nuclear power plants. *Int J Cancer.* 2008a;1220:721–726. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
42. Spix C, Schmiedel S, Kaatsch P, Schulze-Rath R, Blettner M. Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980–2003. *Eur J Cancer.* 2008;44:275–284. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
43. Kaatsch P, Spix C, Jung I, Blettner M. Childhood leukemia in the vicinity of nuclear power plants in Germany. *Dtsch Arztebl Int.* 2008b;105:725–732. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
44. Laurier D, Jacob S, Bernier MO, Leuraud K, Metz C, Samson E, Laloi P. Epidemiological studies of leukaemia in children and young adults around nuclear facilities: A critical review. *Rad Prot Dos.* 2008a;132:182–190. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

45. Sofer T, Goldsmith JR, Nusselder I, Katz L. Geographical and temporal trends of childhood leukemia in relation to the nuclear plant in the Negev, Israel, 1960–1985. *Publ. Health Rev.* 1991;19:191–198. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
46. Jablon S, Hrubec Z, Boice JD., Jr Cancer in populations living near nuclear facilities. A survey of mortality nationwide and incidence in two states. *JAMA.* 1991;265:1403–1408. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
47. Talbott EO, Youk AO, McHugh-Pemu KP, Zborowski JV. Long-term follow up of the residents of the Three Mile Island accident area: 1979–1998. *Environ. Health Perspect.* 2003;111:341–348. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
48. Waller LA, Turnbull BW, Gustafsson G, Hjalmar U, Andersson B. Detection and assessment of clusters of disease: An application to nuclear power plant facilities and childhood leukaemia in Sweden. *Statist Medicine.* 1995;14:3–16. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
49. Kaatsch P, Kaletsch, Meinert R, Michaelis J. An extended study on childhood malignancies in the vicinity of German nuclear power plants. *Cancer Causes Control.* 1998;9:529–533. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
50. Yoshimoto Y, Yoshinaga S, Yamamoto K, Fijimoto K, Nishizawa K, Sasaki Y. Research on potential radiation risks in areas with nuclear power plants in Japan: leukaemia and malignant lymphoma mortality between 1972 and 1997 in 100 selected municipalities. *J Radiol Prot.* 2004;24:343–368. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
51. Laurier D, Hémon D, Clavel J. Childhood leukaemia incidence below the age of 5 years near French nuclear power plants. *J Radiol Prot.* 2008b;28:401–403. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
52. Spycher BD, Feller M, Zwahlen M, Rössli M, von der Weid NX, Hengartner H, Egger M, Kuehni CE. Childhood cancer and nuclear Power plants in Switzerland: a census-based cohort study. *Int J Epidemiol.* 2011;40:1247–1260. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
53. COMARE. Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment. 14th Report: Further Consideration of the Incidence of Childhood Leukaemia Around Nuclear Power Plants in Great Britain. Health Protection Agency; London, 2011. [[Google Scholar](#)]
54. Sermage-Faure C, Laurier D, Goujon-Bellec S, Chartier M, Guyot-Goubin A, Rudant J, Hémon D, Clavel J. Childhood leukemia around French nuclear Power plants – The geocap study, 2002–2007. *Int J Cancer.* 2012;131:E769–E780. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
55. Cook-Mozaffari PJ, Darby SC, Doll R, Forman D, Hermon C, Pike MC, Vincent T. Geographical variation in mortality from leukemia and other cancers in England and Wales in relation to proximity to nuclear installations, 1969–78. *Br. J. Cancer.* 1989;59:476–485. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
56. Birch JM. Genes and cancer. *Arch Dis Child.* 1999;80:1–3. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
57. Lichtenstein P, Holm NV, Verkasalo PK, Iliadou A, Kaprio J, Koskenvuo M, Pukkala E, Skytthe A, Hemminki K. Environmental and heritable factors in the causation of cancer – analyses of cohorts of twins from Sweden, Denmark, and Finland. *N Engl J Med.* 2000;343:78–85. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
58. Bithell JF, Draper GJ, Gorbach PD. Association between malignant disease in children and maternal virus infection. *Br Med J.* 1973;1:706–708. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
59. Blot WJ, Draper G, Kinlen L, Wilson MK. Childhood cancer in relation to prenatal exposure to chickenpox. *Br J Cancer.* 1980;42:342–344. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
60. Golding J, Paterson M, Kinlen LJ. Factors associated with childhood cancer in a national cohort study. *Br. J. Cancer.* 1990;62:304–308. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

61. Bhatnagar N, Nizery L, Tunstall O, Vyas P, Roberts I. Transient Abnormal Myelopoiesis and AML in Down Syndrome: an Update. *Curr Hematol Malig Rep.* 2016;11:333-41.
62. Alexander FE, Ricketts TJ, McKinney PA, Cartwright RA. Community lifestyle characteristics and lymphoid malignancies in young people in the UK. *Eur J Cancer.* 1991;27:1486–1490. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
63. Greaves M. Infection, immune responses and the aetiology of childhood leukemia. *Nat Rev Cancer.* 2006;6:193–203. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
64. Anderson LM, Diwan BA, Fear NT, Roman E. Critical windows of exposure for children’s health: cancer in human epidemiological studies and neoplasms in experimental animal models. *Environ Health Perspect.* 2000;108(Suppl. 3):573–94. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
65. Urquhart JD, Black RJ, Muirhead MJ, Sharp L, Maxwell M, Eden OB, Jones DA. Case-control study of leukaemia and non-Hodgkin’s lymphoma in children in Caithness near the Dounreay nuclear installation. *Br Med J.* 1991;302:687–592. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
66. Kinlen LJ. Can paternal preconceptional radiation account for the increase of leukaemia and non-Hodgkin’s lymphoma in Seascale? *Br Med J.* 1993;306:1718–1721. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
67. Parker L, Craft AW, Smith J, Dickinson H, Wakeford R, Binks K, McElvenny D, Scott L, Slovak A. Geographical distribution of preconceptional radiation doses to fathers employed at the Sellafield nuclear installation. *Br Med J.* 1993;307:966–971. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
68. Draper GJ, Little MP, Sorahan T, Kinlen LJ, Bunch KJ, Conquest AJ, Kendall GM, Kneale GW, Lancashire RJ, Muirhead CR, O’Connor CM, Vincent TJ. Cancer in the offspring of radiation workers: a record linkage study. *Br Med J.* 1997;315:1181–1188. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
69. Pobel D, Viel JF. Case-control study of leukaemia among young people near La Hague nuclear reprocessing plant: the environmental hypothesis revisited. *Br Med J.* 1997;314:101–106. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
70. Kinlen L. Evidence for an infective cause of childhood leukaemia: comparison of a Scottish new town with nuclear reprocessing sites in Britain. *Lancet.* 1988;2:1323–1326. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
71. John TJ, Samuel R. Herd immunity and herd effect: new insights and definitions. *Eur J Epidemiol.* 2000;16:601–606. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
72. Kinlen LJ, O’Brien F, Clarke K, Balkwill A, Matthews F. Rural population mixing and childhood leukaemia: effects of the North Sea industry in Scotland, including the area near Dounreay nuclear site. *Br Med J.* 1993;306:743–748. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
73. Kinlen LJ, Dickinson M, Stiller CA. Childhood leukaemia and non-Hodgkin’s lymphoma near large rural construction sites, with a comparison with Sellafield nuclear site. *Br Med J.* 1995;310:763–768. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
74. Dickinson H, Parker L. Quantifying the effect of population mixing on childhood leukaemia risk: the Seascale cluster. *Br J Cancer.* 1999;81:144–151. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
75. Kinlen L. Childhood leukaemia, nuclear sites, and population mixing. *Br J Cancer.* 2011;104:12–18. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
76. Doll R. The Seascale cluster: a probable explanation. *Br. J. Cancer.* 1999;81:3–5. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]