

Magdalena SZŁĘK,

Zespół Szkół Technicznych w Sosnowcu

Skażenie radioaktywne Polski po awarii w Czernobylu

Streszczenie. Awaria elektrowni atomowej w Czernobylu 26 kwietnia 1986 r. była jedną z największych ekologicznych klęsk cywilizacyjnych. Poniższa praca przedstawia scenariusz klęski, jej skutki oraz prognozy związane z długotrwałym efektem katastrofy, jakim jest skażenie radioaktywne.

1. Cień radioaktywnej chmury. Niebezpieczne promieniowanie

Zdolność wysyłania przez różne substancje promieniowania alfa, beta, gamma w wyniku przemian jądrowych nazywamy promieniotwórczością lub radioaktywnością. Już od miliardów lat docierają do Ziemi promienie kosmiczne. Zanim pojawiły się pierwsze organizmy, nagromadzone były już substancje radioaktywne. Organizm człowieka zostaje więc napromieniowany "z góry i z dołu". Człowiek także emituje promienie, bowiem wraz z pokarmem i wdychanym powietrzem do organizmu dostają się również substancje radioaktywne.

Natężenie promieniowania zaczęło się zwiększać ok. 200 lat temu, kiedy to wskutek gwałtownego rozwoju górnictwa, produkcji cementu, spalania węgla, użycia żużlu do budowy dróg, zostaje zwolnionych coraz więcej substancji radioaktywnych. Obecnie największym źródłem promieniowania radioaktywnego jest szerokie zastosowanie energii atomowej oraz promieniowania jonizującego w gospodarce.

Potencjalne zagrożenie radiologiczne środowiska i ludzi może pochodzić z zakładów produkcji paliwa jądrowego, zakładów przerobu zużytego paliwa, składowisk odpadów

promie-niotwórczych, reaktorów jądrowych itp. Awarie reaktorów jądrowych, wybuchy jądrowe mogą spowodować katastrofalne skażenie środowiska, a tym samym śmierć organizmów żywych.

Referat ten traktuje właśnie o najpoważniejszym uwolnieniu na zewnątrz dużej części zawartości rdzenia, zawierającej mieszaninę krótko- i długożyjących izotopów promienio-twórczych, na skutek awarii elektrowni atomowej w Czernobylu na Ukrainie, która wydarzyła się 26 kwietnia 1986 roku.

2. Scenariusz katastrofy czernobylskiej

Osobliwością całej sprawy jest to, że eksperyment, który postanowiono przeprowadzić na żywym reaktorze nr 4 w Czernobylu, nie był ani zachcianką operatorów, ani problemem poznawczym wydumany przez teoretyków fizyki reaktorowej. Należał on do zagadnień technologicznych, których rozwiązanie miało polepszyć, o ironio, bezpieczeństwo eksploatacji reaktorów RBMK.

Pytaniem postawionym systemowi było: jak długo mogą turbiny na ostatnich obrotach, przy wyłączonym reaktorze zasilać urządzenia zabezpieczające reaktor przed ucieczką w katastrofę? Wybór czasu na eksperyment nie był przypadkowy. Reaktory czernobylskie pracowały bardzo intensywnie w czasie zimy i wiosny, toteż z nastaniem cieplejszej pogody i tak miały zostać wyłączone. Przebieg eksperymentu miał być prosty: najpierw odłączenie reaktora od sieci, obniżenie mocy, wyłączenie i obserwowanie roli spełnianej przez turbogenerator nr 8. Problem był sprowadzony właściwie do układu elektrycznego.

Od północy 25 kwietnia zaczęto obniżać moc - powoli, ponieważ reaktor nie lubi nagłych zmian temperatury - i o godz. 13³⁰ wszystko było gotowe do eksperymentu. Turbina nr 7 była wyłączona, a turbina nr 8 produkowała moc 500 MW. Energii wytwarzanej przez tę turbinę nie chciano użyć do napędzania awaryjnych pomp wodnych, a zmierzyć tylko jej ilość na układzie z symulowanym obciążeniem. W tym momencie gotowości do rozpoczęcia eksperymentu dyspozycja mocy odczuła nagle jej brak (było to piątkowe popołudnie przed weekendem), więc zażądała normalnej pracy. Zapomniano jednak ponownie uruchomić systemy awaryjne, co można położyć na karb zmęczonej załogi.

O 23⁰⁰ nadszedł nowy sygnał z dyspozycji mocy, że zapotrzebowanie na energię spadło i można zaczynać eksperyment. Półtorej godziny później, o godz. 0²⁸ 26 kwietnia, jeden z operatorów wykonał błędne operacje prowadzące do nagłego spadku mocy do 1% nominalnej. Dalsze czynności - wysunięcie prętów regulujących - tylko pogorszyły sytuację.

O 1¹⁹ jeden z operatorów zaczął nerwowo manipulować dopływem wody do reaktora, to zamykając zawór, to otwierając go, by tylko utrzymać niestabilny system w jakiejś takiej równowadze.

Gdy pęcherzyki pary zaczęły się powiększać, pręty regulujące spowodowały przybór mocy i to był ostatni moment możliwości uratowania reaktora. O godz. 1²³ sekund 04 nastąpił ostateczny krok w przepaść, gdy operator odciął dopływ pary do turbogenerатора, a więc wykonał zaplanowany element eksperymentu.

Pompy chłodzące szybko wytracały moc, woda pozostająca w reaktorze zaczęła gwałtownie wrzeć, znów powstały nowe, puste dla neutronów luki. O godz. 1²³ i 40 sekund operator zdecydował nacisnąć guzik awaryjny AZ - 5, ale już było za późno. 199 prętów kontrolnych miało wpaść do rdzenia, ale poruszały się za wolno w stosunku do rozpędu reakcji w rdzeniu. W ciągu 4 sekund moc reaktora skoczyła z 200 MW termicznych do ok. 360 000 MW, a więc 100 razy większej mocy od projektowanej dla RBMK. Pręty spadają z prędkością ok. 40 cm/s, częściowo w wodzie i do ukończenia operacji zabrakło ponad 10 sekund. Jedynemu komercyjalnemu reaktorowi zachodniemu z dodatnim współczynnikiem reaktywności CANDU z ciężką wodą potrzeba na taką operację 1 sekundy.

W tym miejscu zaczyna się chemia, niekoniecznie nawet jądrowa. 60 000 rurek cyrkonowych z dwutlenkiem uranu wzbogaconym do ok. 1,8% uranu 235 zaczęło pękać od nadmiaru energii cieplnej. Transport ciepła wewnątrz pręta ma wartość ograniczoną i dlatego wewnątrz musi się nagrzać w tych warunkach powyżej założonych granic. W ciągu sekundy ok. 30% paliwa uwolniło się z cyrkonowych koszulek strzelając kawałkami w resztę wody i w grafit. Niewątpliwymi reakcjami wtedy zachodzącymi były reakcje cyrkonu z grafitem na węgiel cyrkonu. Powstałe w rezultacie tych reakcji ciśnienie gazów odrzuciło w górę i w bok ważącą kilka tysięcy ton pokrywę rdzenia. Potrzebną do tego energię oblicza się na 0.2 - 2 GJ. Odsunięcie tej pokrywy na bok stworzyło warunki do dochodzenia powietrza podtrzymującego pożar grafitu. Siła grafitu przewróciła też wielki dźwąg, z kolei ten wtrącił do rdzenia maszynę do przeładunku paliwa. W tym momencie nastąpił jeszcze jeden wybuch,

prawdopodobnie z powodu coraz żywszej produkcji wodoru i tlenku węgla oraz swobodnego dopływu powietrza.

Rozrzucone żarzące się kawałki grafitu zainicjowały dalsze pożary w liczbie ok. 30.

Po 15 dniach niemal wojennej operacji, rumowisko reaktora zostało "zalakowane", a pożar pogrzebany pod prawie 5 tysiącami ton masy uszczelniającej, spuszczonej ze śmigłowców, a składającej się z gliny, piasku, boru i ołowiu.

3. Dalsze losy i skutki pożaru

Pożar tych dwóch tysięcy ton grafitu naszpikowanych cyrkonem, stalą rurek wodnych, a nade wszystko uranem i produktami rozszczepienia uranu-235 oraz plutonem powstałym z uranu 238 jest zdarzeniem, które przejdzie do historii pożarnictwa. Temperatura sięgnęła ok. 5000 °C, czyli bardzo jasnego żaru, przekroczyła więc temperaturę topnienia wielu składników mieszaniny, w tym dwutlenku uranu. Grafit nie topi się, lecz sublimuje w temp. ok. 3600 °C, w próżni oczywiście. Przy dostępie powietrza wcześniej się zapalił niż zdąży sublimować. Cząstki paliwa od początku były prawdopodobnie już częściowo stopione, a mikronowe kuleczki znajdowały się w dużych odległościach od Czernobyla.

Od chwili otwarcia rdzenia, w reaktorze nr 4, na dostęp powietrza do łatwopalnej i już zainicjowanej masy rozpoczęły się zjawiska opisywane przez chemię i chemię fizyczną. Zaczęła się destylacja poszczególnych składników rządzonej lotnością poszczególnych pierwiastków i ich związków. Uleciały najpierw radioaktywny ksenon i lotny w tej temperaturze jod. Z metali oczywiście cez-137, który tak zaważył na długotrwałym skażeniu.

Jednakże to nie łatwość przechodzenia w stan gazowy decydowała o skażeniu nuklidami, które możemy uważać za nielotne. Masie palącego się grafitu należy przypisać wytworzenie ciągu gorących gazów, które porywały nie tylko cząstki aerozolowe, ale całkiem spore ilości toksycznych mieszanek. Ciąg gorących gazów był zadziwiająco duży jak na geometrię "paleniska" i warunki meteorologiczne. Cząstki osiągały przecież prędko wysokość 10 km, jak to wykazały polskie pomiary cytowane przez źródła zachodnie. Podróżowały w ten sposób cząstki paliwa, które później lądowały i były wykrywane jako tzw. gorące punkty.

Wehikułem transportu cząstek stałych były też płatki sadzy, które tworzyły się wtórnie z grafitu i służyły jako żagiel. Zresztą sam grafit, rozluźniony działaniem promieniowania i temperatury jest też lekkim i może być nośnikiem cząstek radioaktywnych. Tak czy inaczej był to transport mechaniczny, najbardziej podobny do fluidalnego. Na podobnej zasadzie wędruje setki kilometrów materiał radioaktywny ze spalonego polskiego węgla, nie wychwycony przez odpylacze elektrostatyczne.

Analiza chemii zrzutu z reaktora czernobylskiego jest komplikowana ogromnymi ilościami materiału obcego wrzucanego z helikopterów do rdzenia. Na przykład zrzucano tysiące ton ołowiu starając się wykorzystać ciepło topnienia i wrzenia tego metalu. Stwierdzono wówczas znaczne obniżenie temperatury, co wskazuje istotnie na wygotowanie się całego ołowiu. Ale oznacza to jednocześnie ulatywanie groźnego dla środowiska metalu, utleniającego się po drodze na łatwiej przyswajalne - ze skutkami toksycznymi - tlenki.

Wlewana do rdzenia woda też nie była bez znaczenia. Pogorszyła tylko sytuację wzmagając jeszcze pożar przez dostarczenie tlenu w ilości 5 tysięcy razy większej niż w powietrzu na jednostkę objętości.

Katastrofa czernobylska wykazała dobitnie, że reaktory typu RBMK stanowią szczególnie ryzyko polegające na tym, że gdy raz się zapalą, to możliwości uratowania i zapobieżenia najgorszemu scenariuszowi są praktycznie żadne. Toteż z ulgą przyjęto wiadomość o rezygnacji z budowy bloków nr 5 i 6 w Czernobylu. To na pewno był ruch we właściwym kierunku, gdyż jak twierdzą rosyjscy naukowcy, w zniszczonym reaktorze znajduje się ok. 160 ton częściowo wypalonego paliwa uranowego, które nadal emituje promieniotwórcze związki. Betonowy bunkier nie jest wytrzymały na warunki atmosferyczne i dziurawi go deszcz. Nie jest też jednoznacznie przesądzona przyszłość elektrowni w Czernobylu. W każdym z jej trzech ocalałych reaktorów są 192 tony jądrowego gorącego paliwa. Tylko w 1989 r. zanotowano tam 30 awarii, z tego 13 z winy personelu. Dyrektor Instytutu Radiologii AN Białorusi J. Konopia uważa, iż elektrownię należy zamknąć, nikt bowiem nie ma prawa prowokować losu po raz drugi, tym bardziej że w krajach b. ZSRR funkcjonuje jeszcze ponad 50 elektrowni atomowych zbudowanych wg tego samego projektu, co siłownia czernobylska.

Tabela 1

Zawartość radionuklidów w reaktorze nr 4
Czernobylskiej Elektrowni Jądrowej
w dniu 26.IV.86 (wg US Dept. of Energy, 1987)
oraz procent ich uwolnienia
do atmosfery (wg IAEA, 1986)

Radionuklid	Aktywność [Bq lub g]	Uwolnienie [% zawart.]
^{85}Kr	3,3E16	~ 100
^{133}Xe	7,3E18	~ 100
^{131}I	3,1E18	20 ^a
^{132}Te	3,3E18	15
^{134}Cs	1,9E17	10 ^b
^{137}Cs	2,9E17	13 ^c
^{106}Ru	2,0E18	2,9
^{144}Ce	3,2E18	2,8
^{89}Sr	2,3E18	4,0
^{90}Sr	2,0E18	4,0
Transuranowce	8,4E14-3,6E18	3,0
Całkowita zawartość	1,2E20	
Inne oceny uwolnień: a - USDOE, 1987 -55%, UNSCEAR, 1988 - 25%; b - USDOE, 1987 -15%, UNSCEAR, 1988 - 18%; c - USDOE, 1987 -31%, UNSCEAR, 1988 - 25%.		

4. Wpływ wybuchu reaktora w Czernobylu na skażenie i stan środowiska oraz stan zdrowia ludzi w Europie

W wyniku pożaru reaktora uwolnione zostało promieniowanie radioaktywne rzędu 50 mln Curie (50 Mcurie), choć Aleksander Sich, inżynier zajmujący się energią atomową, podaje, że w ciągu pierwszych 10 dni tragedii do atmosfery dostało się ok. 200 mln Curie substancji promieniotwórczych. Jednakże gdyby nawet faktycznie ze zniszczonego reaktora w Czernobylu wydostało się kilka razy więcej materiałów radioaktywnych, to i tak nie miałyby to wpływu na stan skażenia promieniotwórczego w Polsce.

W ciągu 10 dni emisji zmienne warunki pogodowe, z wiatrami wiejącymi w różnych kierunkach, doprowadziły do bardzo skomplikowanej sytuacji skażeń. Z całkowitej aktywności uwolnionego cezu-137, 43% zdeponowało się w Związku Radzieckim, 38% poza jego granicami w Europie, 8% na oceanach, a reszta w innych rejonach półkuli północnej. Radioaktywna chmura przeszła przede wszystkim nad Ukrainą i Białorusią, i tam spowodowała największe szkody. Najwyższą "lokalną" dyspozycję cezu-137 poza ZSRR stwierdzono w Szwecji (85 kBq/m²), w Bawarii (45 kBq/m²), w Szwajcarii (43 kBq/m²), w Austrii (33 - 59 kBq/m²). Średnia dyspozycja tego nuklidu w Szwecji wahała się w różnych rejonach od 0,8 do 31 kBq/m², w Finlandii wynosiła 14,7 kBq/m², w RFN od 2,7 do 16 kBq/m², w Rumunii 4,5 do 18 kBq/m², w Szwajcarii 1,3 do 14,8, a w Polsce - 5,2 kBq/m².

W czasie opadu radioaktywnego w pierwszej kolejności narażone są drzewa, których korony spełniają rolę filtrów powietrza. Stwierdzono, że w pobliżu elektrowni drzewa przejęły 80 - 90% rozproszonych, wysoko aktywnych fragmentów rdzenia reaktora i ten sposób w pewnym stopniu ochroniły żyjące pod nimi organizmy. Na obszarze 4 km² wyginęły drzewa iglaste, tworząc tzw. czerwony las. Największe straty powstały w lasach sosnowych, w których dawka pochłonięta sięgała 80 - 100 Gy. Lasy liściaste praktycznie nie uległy uszkodzeniu. W rejonach o dawce poniżej śmiertelnej dla drzew iglastych (8 - 10 Gy) niektóre młode drzewa, 10 - 12-letnie, również wymarły, a 90 - 95% z nich miało objawy martwicy. W rejonach dawek 2 - 4 Gy większość sosen miała krótsze, zakrzywione i pogrubione przyrosty, z częściowo tylko zachowanymi szpilkami. W szpilkach nienormalnych przyrostów obserwowano zniszczenie kompleksu chlorofilo-białkowo-lipidowego. Wśród 29 roślin dzikich, narażonych na moc dawki 0,1 - 2,5 mGy/h masa nasion i siła kiełkowania uległy zniszczeniu.

Prof. Jerzy Zalasinski twierdzi, że dawki stukrotnie mniejsze niż te, które otrzymali mieszkańcy Polski po katastrofie w Czernobylu powodują genetyczne zmiany w roślinach. Jednocześnie po Czernobylu mamy do czynienia z nowym zjawiskiem - interakcją toksykologiczną. Decyduje ona o tym, że nawet małe dawki promieniowania nakładają się na na działające od dawna trucizny, jak np. tlenki azotu czy siarki lub benzopiren. Nie wiadomo jednak, w jaki sposób odbije się to na stanie zdrowia.

Nie zauważono zwiększonej śmiertelności, zmniejszenia płodności lub migracji dzikich zwierząt w pierwszym okresie po wypadku. Jednak na silnie skażonych terenach, gdzie moc dawki wahała się od 0,0004 do 4,0 mGy/h, ocenia się, że dawka pochłonięta przez gryzoni musiała sięgać od 6 do 60 Gy od napromieniowania zewnętrznego i ok. dziesięciokrotnie mniej od spożytych radionuklidów, a więc należałoby oczekiwać, że 50 do 90% gryzoni powinno zginąć na tych terenach (LD dla gryzoni wynosi 6 - 12 Gy). Na tych terenach zaobserwowano jednak na wiosnę 1987 r. silny wzrost liczby gryzoni, co wynikało prawdopodobnie z migracji z rejonów przyległych na pola z pozostałymi uprawami, opuszczone przez ludzi i zwierzęta domowe. Liczba gryzoni wzrosła na całym skażonym terenie z ok. 56 zwierząt na hektar przed awarią, do 600/ha. Zbyt wcześnie jest jednak na ocenę skutków genetycznych i zdrowotnych. Zaobserwowano na razie wśród fauny i flory już zmiany teratogenetyczne.

A jak żyją ludzie znajdujący się w najbliższym sąsiedztwie elektrowni?

Paradoksem jest to, że uwolnienie niebezpiecznych związków z elektrowni czernobylskiej nastąpiło na terenie, gdzie gęstość zaludnienia była trzykrotnie większa niż średnio na Białorusi, 1,7 raza wyższa niż średnio na Ukrainie i podobna do gęstości zaludnienia w Polsce, Danii czy Szwajcarii.

Na samą Białoruś przypadło 70% skażenia radioaktywnego, co oznacza, że 2,2 mln osób żyje w strefie, gdzie radiacja wynosi 1 Curie/km² (1/5 mieszkańców republiki). W rejonach, w których skażenie przekracza 15 Curie mieszka 102 tys., w tym 30 tys. dzieci. Nie wolno im dotykać warzyw i owoców z własnego ogródka, kąpać się w rzekach, korzystać z darów lasu.

92 uczonych z Akademii Nauk, wśród nich minister zdrowia ówczesnego Związku Radzieckiego, usiłowało bagatelizować skutki katastrofy twierdząc, że ludzie mogą nadal żyć w strefie skażenia, byleby radiacja nie przekraczała 40 Curie/km², zewnętrzna doza napromieniowania nie przewyższała 35 berów. Wyznaczono umowną strefę zagrożenia w promieniu 30 km od Czernobyla, ogłaszając, że inne tereny są bezpieczne. Wysiedlenie rozpoczęło się kilka dni po awarii. Czwarty blok tymczasem "dymił" dalej, dzieci bawiły się na dworze, wszyscy pili mleko skażone jodem-131. W pierwszych miesiącach po awarii wysiedlono mieszkańców z terenu skażonych promieniowaniem większym niż 40 Curie/km².

Jeszcze kilka lat po katastrofie (także na skutek uwag czynionych przez zagranicznych ekspertów) trwa wywożenie rodzin z terenów skażonych powyżej 15 Curie/km². Jednak

problemów, jak zwykle nie brakuje. Brakuje natomiast 25% mieszkań dla przesiedleńców. W Mogilewie np. (skazenie 40 Curie/ km²) mieszka 1000 rodzin, ponieważ w Mińsku i Witebsku nie wybudowano dla nich mieszkań przewidzianych w planie. Na Białorusi wprowadzono prawo do przesiedlenia się w dowolnie wybrane miejsce. Okazało się, że z możliwości takiej "przeprowadzki" korzysta znacznie więcej rodzin niż z przesiedleń we wskazane miejsca zamieszkania (np. w 1990 r. z witebskiego obwodu na "obowiązkowe" osiedlenia wyjechały 542 rodziny, zaś z prawa wyboru nowego miejsca zamieszkania skorzystało 960 rodzin). Ludzie jednak niechętnie opuszczają swe rodzinne strony, niektórzy wracają i "przenikają" w zakazane strefy.

Do 1991 r. przesiedlono prawie milion osób. W 1988 r. sytuację oceniano bardziej optymistycznie, toteż wydawało się, że tylko 60 000 osób narażonych jest na duże dawki promieniowania jonizującego większe niż 70 milisiwertów. Jednakże z samej Białorusi należałoby wywieźć 800 000 ludzi. Jest to po prostu niemożliwe, toteż ówczesne radzieckie ministerstwo zdrowia przyjęło "normę" 350 milisiwertów/życie. Dawkę taką jako bezpieczną ustaliła komisja do spraw atomistyki Leonida Iljina. Taka sama dawka promieniowania przewidziana była w ZSRR dla osób zawodowo narażonych na promieniowanie, zaliczonych do kategorii "B", czyli np. pracujących w administracji elektrowni atomowych.

Zostaje pytanie: jak opad czernobylski wpłynął na stan zdrowia ludzi na Białorusi i w Polsce?

Po katastrofie wśród ludzi nie zanotowano objawów choroby popromiennej. Objawy takie wystąpiły u 237 osób pracujących w elektrowni i próbujących ugasić pożar. 31 osób zmarło bezpośrednio po wybuchu. W państwowym rejestrze medycznym znajduje się 576 000 osób, które wchłonęły duże dawki promieniowania, w tym 226 000 "likwidatorów" - ludzi zatrudnionych w Czernobylu przy likwidacji skutków awarii. Prawdopodobnie jest ich znacznie więcej. "Likwidatorzy" przez 3 lata starali się o uznanie ich organizacji związkowej i prawa do renty inwalidzkiej. Oficjalnie mówi się, że jest 112 000 inwalidów czernobylskich, a drugie tyle stara się o renty. Związkowcy twierdzą, że samych tylko "likwidatorów, których zdrowie ucierpiało na skutek promieniowania pochłoniętego w Czernobylu, jest grubo ponad pół mln. W najbliższym czasie umrze co setny z nich.

Białoruska Agencja Prasowa stwierdza, że w ostatnich latach zaznaczył się wzrost urodzeń dzieci z wrodzonymi wadami rozwoju. Wynosi on ok. 2%. Nie sposób jednak przypisać tego

zjawiska wyłącznie promieniowaniu, bo w gomelskim i mogilewskim obwodach, należących do poważnie skażonych, takich dzieci urodziło się mniej niż na "czystych" terenach.

Doświadczenie z Hiroszimy wskazuje, że zachorowania na białaczkę najwcześniej notuje się po 2 latach od chwili silnego napromieniowania, najczęściej zaś choroba ta objawia się w okresie od 5 do 10 lat.

Na Białorusi po katastrofie na ostre białaczki (najczęściej występujące u dzieci) równie często chorują mieszkańcy terenów skażonych, jak i nieskażonych. Więcej natomiast stwierdza się zachorowań na chroniczne białaczki (charakterystyczne dla ludzi dorosłych). W obwodzie mogilewskim zachorowalność wzrosła od 2,8/100 tys. ludności w 1984 r. do 6,1 w 1987 r. Jednakże w 1989 r. zachorowalność spadła i wynosiła 4,4 wobec "średniej republikańskiej" zachorowalności wynoszącej 3,5/100 tys. ludności. Rodzi się więc pytanie, czy białaczki rozwijają się na skutek napromieniowania, czy też wzrosła "wykrywalność" tych chorób.

Ze statystyk wynika, że zachorowalność na nowotwory złośliwe w latach 1981 - 1985 wzrosła na Białorusi o 17%. Podobna sytuacja była w latach 1986 - 1989. Zachorowalność na te choroby wzrastała więc w podobnym tempie zarówno przed, jak i po awarii. Wyjątek stanowią choroby tarczycy, organu najbardziej zagrożonego promieniowaniem jonizującym, ponieważ ma on zdolność wybiórczego gromadzenia jodu. W chmurze radioaktywnej jodu-131 było aż 17%.

Notuje się wzrost przypadków zmian patologicznych w obrębie tarczycy wynoszący ok. 11% rocznie w stosunku do 1985 r. Ale znów nie wiadomo w jakim stopniu wzrost ów jest wynikiem lepszej wykrywalności chorób tarczycy, a w jakim oddziaływania promieniowania.

Natomiast z danych w szpitalu w Chojnikach oraz z regionu Homla i Mogilowa wynika m.in., że:

- rak tarczycy u dzieci pojawia się 3 do 10 razy częściej niż przed katastrofą,
- dwie trzecie dzieci zaczyna tracić wzrok,
- co piąte dziecko zaczyna tracić słuch,
- zazębień występują trzykrotnie częściej niż przedtem,
- półtora raza częściej - choroby wątroby, nerek, białaczka,
- liczba anemii powiększyła się od 4 do 12 razy w stosunku do 1989 r.
- dorośli cierpią na nadciśnienie, choroby serca i układu odpornościowego, zabija ich nawet grypa.

A jak sytuacja zdrowotna przedstawia się w Polsce?

Wśród izotopów, jakie po przejściu chmury radioaktywnej spadły na nasz kraj, szczególną łatwość przenikania do przewodu pokarmowego, a następnie do całego organizmu człowieka mają izotopy jodu (J-131), cezu (Cs-134 i Cs-137) oraz strontu (Sr-90). Z punktu widzenia ewentualnych zagrożeń najbardziej obawiano się J-131, którego sporo, choć wagowo niewiele, 30...40 g - spadło na Polskę. Izotop ten gromadzi się w tarczycy, mogąc powodować jej stan chorobowy. Ma to szczególne odniesienie do dzieci, których tarczyca jest niewielka (masa 2 g, 10 razy mniejsza niż u dorosłych). Prowadzone we Wrocławiu badania w 1990 r. w ramach programu MZ XVII są interesujące choćby z tego powodu, że istnieje tam baza porównawcza dla otrzymanych wyników. Dolny Śląsk, obok regionu krakowsko-nowosądeckiego, to region endemiczny, jeżeli chodzi o zapadalność na chorobę tarczycy, zwaną wolem.

Sprawdzania hipotezy o narastającej epidemii wola podjął się "Dolmed" w 1985 r., a więc rok przed awarią w Czernobylu. Badaniami opracowanymi przez dr Katarzynę Żkowską-Kowalską objęto wybranych metodą losową ok. 7,2% mieszkańców wrocławskiej dzielnicy Stare Miasto. Wole stwierdzono u 4,1% mężczyzn i 14,9% kobiet. Co ciekawsze, na skutek złej profilaktyki odwróciły się proporcje - kiedyś zdecydowanie przewyższały przypadki wola mięsżowego, w 1985 r. - guzkowego.

Jednym słowem, ulatniający się z Czernobyla jod-131 trafił na Dolnym Śląsku na wyjątkowo podatny grunt.

Autorka ankiety dr Grażyna Karbowska stwierdza, że jej zbiorcze wyniki nie są jeszcze opracowane. Z badań pilotowych, które w październiku 1989 r. przeszło ok. 1200 osób, wynika, że aż 33% z nich ma wyczuwalne powiększenie tarczycy. Po przebadaniu w ramach pierwszego etapu 4200 osób odsetek ten spadł do 26%, ale jest znacznie większy (o prawie 60%) niż w 1985 r. I jeszcze jedno: tylko połowa badanych zdaje sobie sprawę, że ma wole. Nasuwa to przypuszczenie, że druga połowa przypadków tej choroby bądź była niezauważona, bądź też powstała po 1986.

Specjaliści od lat apelują o powszechną profilaktykę jodową. Do dokładniejszego określenia tego pierwiastka ma się przyczynić przeprowadzona w 1994 r. akcja Thyro-Mobil. Dwaj lekarze, jeżdżący specjalnym autobusem (wyposażonym w ultrasonograf), odwiedzili 11 krajów Europy, w których przebadali dzieci w wieku 6-14 lat.

Również w Polsce badania takie przeprowadzono we wrześniu 1994 r. wśród uczniów z woj. bielskiego, jeleniogórskiego, lubelskiego, łódzkiego, tarnobrzeskiego, a także wałbrzyskiego. Ocenia się, że mniej więcej u 30% dzieci w naszym kraju występuje wole.

Możliwe, że wymieniony procent byłby mniejszy, gdyby płyn Lugola podano dzieciom wcześniej, a nie z kilkudniowym opóźnieniem. Sama agencja TASS przetrzymywała informację o wybuchu przez 2 doby, po czym w Polsce zablokowano ją dodatkowo na 1 dzień. Jakby tego było mało, Krystyna Bożkowska, dyr. Instytutu Matki i Dziecka w Warszawie, ekspert Światowej Organizacji Zdrowia, na oczach całej Polski zapewniała w telewizji zdezorientowanych rodziców, że pobyt dzieci na dworze w kilka dni po wybuchu niczym nie grozi, a nawet będzie korzystny, bo zmuszając do częstszego mycia się podniesie poziom higieny. Takich potwornych dezinformacji i zalewu uspokajających kłamstw było wiele (np. oburzający jest fakt, że w skażonym Czernobylu orządzano pokazowe wesela, festyny, że pozwolono zorganizować 1-majową demonstrację na kijowskim Kreszczatiku, czy to, że w okolicach Czernobyla całymi klasami wysyłano młodzież, aby zbierała kartofle. Taka zadziwiająca była obojętność władz na los ludzki, gdy ze skażonego rejonu najpierw wywieziono krowy i świny, a dopiero potem kobiety z dziećmi).

Jednakże w ostatnich latach mamy coraz więcej dostępnych informacji i artykułów, które nie ukrywają prawdy i podają aktualne dane na temat skażeń radioaktywnych. W dalszej części mojej pracy będę chciała przedstawić aktualne dane na temat skażeń.

Myszę, że oprócz zapoznania się ze stopniem skażeń radioaktywnych w Polsce, ważne jest także zapoznanie się ze skażeniem przyrody, czyli powietrza, gleby, wody i żywności.

5. Co się działo w Polsce po awarii w Czernobylu?

Awaria reaktora w elektrowni jądrowej w Czernobylu 26 kwietnia 1986 r. doprowadziła do katastrofalnego uwolnienia substancji radioaktywnych i skażenia promieniotwórczego środowiska. Było to największe uwolnienie substancji promieniotwórczych w historii energetyki jądrowej i trzecie, jeśli chodzi o wykorzystanie energii jądrowej przez człowieka (biorąc pod uwagę także próbne wybuchy jądrowe). Na terytorium Polski spowodowało, w porównaniu z krajami bardziej odległymi, skażenia raczej umiarkowane.

W pierwszych dniach awarii mieliśmy do czynienia przede wszystkim z wysokim skażeniem powietrza atmosferycznego, spowodowanym głównie promieniotwórczymi izotopami jodu. Skażenie to było jednak krótkotrwałe i począwszy od 8 lipca 1986 r. stężenie np. J-131 było już niewykrywalne, a w sierpniu aktywność powietrza powróciła do stanu sprzed katastrofy i wynosiła ok. 1 mBq/m^3 (Rys. 1a i 1b).

Jednak o poziomie skażeń i zagrożeniu radiologicznym decydują głównie izotopy długożyciowe: Cs-137, Cs-134, Sr-90. Izotopy promieniotwórcze o średnich okresach półrozpadu (takie jak cyrkon-90, ruten-103, bar-140), zostały wyemitowane z reaktora w niewielkich stężeniach, uległy rozpadowi i nie stanowiły większego zagrożenia jako substancje słabo przyswajalne przez organizmy żywe. Na szczęście stront-90 i izotopy promieniotwórcze emitujące promieniowanie alfa zostały także uwolnione w małych ilościach i zagrożenie pochodzące z tego źródła mogło być pomijane.

Skażenie powierzchni Ziemi jest proporcjonalne do skażenia przyziemnej warstwy atmosfery i zależy od wielu czynników. W tym przypadku szczególne znaczenie miała pogoda. Na skutek lokalnie występujących deszczów w rejonach, gdzie skażenie powietrza było stosunkowo niewielkie, wystąpiło o wiele wyższe skażenie gruntów. Substancje promieniotwórcze zostały wypłukane z powietrza. Sumaryczną aktywność miesięczną opadu całkowitego w kraju pokazuje rys. 1a, a średnią całkowitą aktywność beta opadu w latach 1962-1988 rys. 1b.

Skażenie gleby jest pochodną opadu całkowitego. Najwyższe skażenia zanotowano w województwach północno-wschodnich oraz we wrocławskim i opolskim. Doskonałym wskaźnikiem promieniotwórczego skażenia jest stężenie izotopów promieniotwórczych cezu Cs-137 i Cs-134. Przed katastrofą średnie stężenie cezu-137 w glebie (do 10 cm głębokości) wahało się w granicach $0,20 - 0,95 \text{ kBq/kg}$, natomiast po katastrofie wynosiło $5,2 \text{ kBq/kg}$.

Skażenia wody w Polsce zależały przede wszystkim od:

- wielkości i głębokości zbiornika,
- przepływu wody.

Rozkład skażeń wody na terenie naszego kraju był jeszcze bardziej zróżnicowany niż opadu całkowitego i gleby, jednak skażenia te były krótkotrwałe i główny udział miał w nich jod-131. Stężenie pozostałych izotopów było minimalne. Procesy uzdatniania wody powodowały, że skażenie wody wodociągowej było dwukrotnie niższe niż w otwartych zbiornikach. Poziom

skażenia wód wyraża się tzw. globalną aktywnością beta (in. całkowitą aktywnością beta). Średnia wartość aktywności beta w końcu kwietnia wynosiła ok. 9,8 Bq/l, w maju spadła do poziomu 4,2 Bq/l, by w połowie roku powrócić do stanu sprzed katastrofy równego 0,4 Bq/l. Należy jednak pamiętać, że średnie miesięczne aktywności beta prób wody powierzchniowej normalnie wykazują duży rozrzut - od 0,03 do 5 Bq/l. Spowodowane jest to różnymi zawartościami naturalnego izotopu potasu-40.

Skażenia powietrza i terenu spowodowały wzrost mocy dawki promieniowania gamma na obszarze kraju; w czasie katastrofy wynosiła ok. 1 pA/kg (12 mR/h). Maksymalne wartości mocy dawki notowano między 29 kwietnia a 3 maja 1986 r., średnio dziesięciokrotnie wyższe. Najwyższą wartość 32 pA/kg (450 mR/h) zmierzono w Białej Podlaskiej 29 kwietnia. Obecnie wyższe niż przed katastrofą skażenia gleby nie stwarzają zagrożenia radiologicznego dla ludzi, ponieważ izotopy przeniknęły w głąb ziemi, a ich promieniowanie jest pochłaniane przez warstwę gleby.

Następstwem skażenia promieniotwórczego środowiska jest skażenie żywności. Istotne zagrożenie dla człowieka i zwierząt stanowią tylko niektóre izotopy promieniotwórcze. Są to pierwiastki, które dostają się do organizmu drogą pokarmową i w niewielkim stopniu drogami oddechowymi. Należą do nich izotopy strontu i cezu. Podobnie jak w przypadku poprzednio omawianych skażeń, w pierwszym okresie po katastrofie największy udział w skażeniu produktów żywnościowych miał jod-131. Skażenia jodem-131 w wybranych województwach przedstawia rys. 3 Różnice w skażeniu mleka pokrywają się z różnicami poziomu skażeń na terenie całego kraju. Warto zaznaczyć, że niebagatelny wpływ na poziom skażenia miało stosowanie się do zalecenia niewypasania krów na pastwiskach. Niemal identyczny rozkład skażeń zaobserwowano w przypadku cezu i tak samo zależał on od sposobu karmienia krów. Na wykresie (rys. 4) przedstawiono zawartości cezu-137 w mleku w Polsce roku 1986, a na rys. 8. cezu i strontu w latach 1985 - 1992.

Skażenia strontem były niewielkie, niemniej jednak średnią aktywność tego izotopu w pierwszych miesiącach po katastrofie notowano mniej więcej jako dwukrotnie wyższą niż przedtem. Warto jednak wiedzieć, że o ile skażenia cezem-137 dało się porównać do skażeń w latach 60., o tyle skażenie strontem-90 było wielokrotnie niższe.

Do połowy maja 1986 r. nie notowano skażenia mięsa izotopami cezu. Dopiero później, na skutek kumulacji w organizmach zwierząt, zaczęło ono rosnąć. Skażenie mięsa w bardzo

dużym stopniu zależało, tak jak w przypadku mleka, od sposobu karmienia zwierząt. Poziom skażenia zaczął się obniżać dopiero w 1987 r. Do dnia dzisiejszego notujemy jego podwyższony poziom. W największym stopniu skażone zostały organizmy zwierząt dziko żyjących.

Bardzo zróżnicowane były skażenia owoców i warzyw. Wysoki poziom stwierdzono we wszystkich owocach zbieranych w czerwcu i lipcu 1986 r. (z wyjątkiem truskawek, które prawdopodobnie zdołały nagromadzić sporo substancji mineralnych zanim została skażona gleba). Najbardziej ucierpiały te gatunki, które w momencie przechodzenia skażonych mas powietrza znajdowały się w okresie kwitnienia. Wysokie skażenia warzyw zanotowano jedynie w wypadku warzyw liściowych, zbieranych w maju i czerwcu. U pozostałych skażenie nie przekraczało kilkunastu Bq/ kg. W 1987 r. poziom skażeń spadł do ok. 1,5 Bq/ kg, a w 1989 r. był już poniżej 1 Bq/ kg.

Wiele emocji do dnia dzisiejszego budzi poziom skażenia grzybów. W 1986 roku najwyższe aktywności izotopów cezu notowano w podgrzybkach - średnio 750 Bq/ kg (Rys. 4). Ciekawe, że badając aktywność grzybów w kolejnych latach po katastrofie w Czernobylu, stwierdzono w 1987 r. obniżenie zawartości cezu, aby w 1988 zanotować ponowny jej wzrost i to nawet powyżej poziomu z roku 1986. Sytuacja ta powtarza się w kolejnych latach. Przypuszcza się, że jest to wynik kumulowania się cezu w zbiorowisku leśnym (a w szczególności - ściółce leśnej), gdyż - jak pokazano na rys. 2b, podwyższony poziom tego izotopu już nie występował w opadzie.

Omówione zostały kolejno skażenia powietrza, wody, gleby i żywności. Teraz omówię ich skutki dla ludności.

Głównym źródłem narażenia ludności na otrzymanie zwiększonych dawek promieniowania była obecność w powietrzu znacznie zwiększonych ilości izotopu promieniotwórczego J-131 (rys. 2b i 3a), który powodował narażenie zewnętrzne i wewnętrzne. Napromieniowanie wewnętrzne następowało na skutek oddychania skażonym powietrzem i spożywania skażonego mleka, co szczególnie dotyczyło dzieci. Zagrożenie było stosunkowo duże i obejmowało przeważające obszary kraju, dlatego zdecydowano się (po raz pierwszy na świecie) na przeprowadzenie akcji profilaktycznej na masową skalę. Akcja ta polegała na podawaniu niemowlętom i dzieciom w wieku do lat 16 preparatu jodowego, zawierającego jod

naturalny, aby zablokować tarczycę, przy czym zdawano sobie sprawę, że przedawkowanie jodu może spowodować zaburzenia w jej funkcjonowaniu. W przypadku długotrwałego skażenia jodem-131 skuteczność jednorazowej dawki jodu stabilnego zależy, oczywiście, od wielkości skażenia i czasu, w którym blokada została zastosowana, mierzonego od momentu pojawienia się chmury radioaktywnej. Największą skuteczność działań profilaktycznych uzyskuje się przy zastosowaniu ich tuż przed pojawieniem się skażenia.

Na rys. 8 pokazano wielkości dawek obciążających tarczycę i całe ciało u dorosłych i u dzieci (uwzględniono osoby poddane akcji profilaktycznej i nie objęte tą akcją) w rejonach silnie skażonych. Stosowanie zaleconych metod przeciwdziałania (blokada tarczycy i zalecana dieta) zmniejszało dawkę pochłoniętą przez dorosłych ok. 1,5 razy, a przez dzieci nawet 4,5 razy. Ocenia się, że wartość efektywnego równoważnika dawki obciążającej (dawka, jaką otrzymują w wyniku wchłonięcia jodu promieniotwórczego w ciągu 50 lat) będzie się wahać w granicach 0,37 mSv do 2,14 mSv (średnio 0,932 mSv), natomiast efektywny równoważnik dawki w pierwszym roku po katastrofie wynosił średnio 0,30 mSv (na terenach mało skażonych 0,12, a na silnie skażonych 0,76 mSv).

Biorąc pod uwagę przyjęte przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP) wielkości dawek granicznych dla ludności stwierdzono, że dawka pochłonięta przez większość osób dorosłych na terytorium Polski nie przekroczyła wartości granicznej, a wieloletni efektywny równoważnik dawki nie przekracza jego rocznej wartości od naturalnych źródeł promieniowania (2,8 mSv).

Oceniając skutki katastrofy w Czernobylu z perspektywy upływu czasu stwierdzamy, że:

- wysokie skażenie powietrza, głównie izotopami jodu, trwało dość krótko,
- poziom skażeń podstawowych produktów żywnościowych długotrwałymi izotopami promieniotwórczymi cezu i strontu nie był wysoki i dość szybko się obniża; należy pamiętać, że o wielkości dawki otrzymanej od skażeń wewnętrznych decyduje suma aktywności izotopów wchłoniętych przez organizm w określonym czasie i te wielkości odnosi się do ustalonych rocznych limitów wchłonieć (dla przykładu: roczny limit wchłonieć dla promieniotwórczych izotopów cezu wynosi 400 000 Bq dla ludności nie narażonej zawodowo),

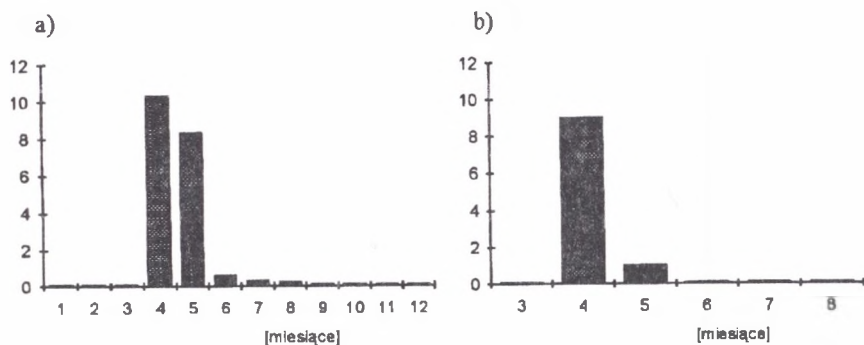
- izotopy cezu - mimo długich okresów półtrwania kumulują się w organizmie; ich biologiczny półokres wydalania wynosi niewiele ponad 100 dni u dorosłych, a u dzieci kilkanaście dni.

Skażenia po katastrofie w Czernobylu objęły olbrzymie obszary Europy, choć nie były globalne, tak jak w latach 60. (tabela 2), kiedy mieliśmy do czynienia z próbami jądrowymi w atmosferze. Zanotowane wówczas skażenia dotyczyły całej kuli ziemskiej, a skażenia promieniotwórczymi izotopami długożyciowych pierwiastków były większe (por. rys. 2), przy czym nie zastosowano żadnych środków profilaktycznych. Cs-137 wprowadzony do środowiska w okresie przeprowadzania prób jądrowych jest do dziś obserwowany na obszarze całego świata.

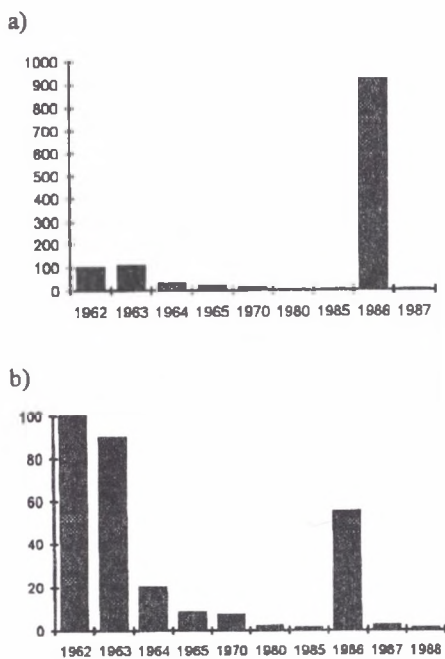
Tabela 2

Średni poziom skażenia obszaru Polski
na podstawie aktywności beta
w okresie 30 lat - od 1960 do 1990 r.

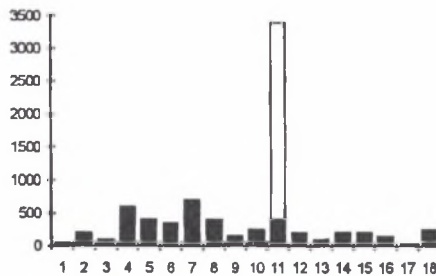
Rok	kBq/ m ²
1960	1,4
1962	37,8
1963	34,7
1965	2,7
1970	2,5
1975	0,8
1980	0,5
1985	0,4
1986	19,0
1987	0,5
1990	0,4



Rys. 1. a) Średnia aktywność opadu promieniotwórczego w Polsce 1986 r. (kBq/m^2),
b) średnia miesięczna globalna aktywność beta powietrza w Polsce w 1986 r. (Bq/m^3)

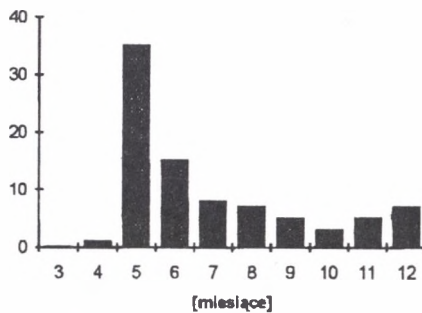


Rys. 2. a) Średnia całkowita aktywność beta w Polsce w latach 1962 - 1987 (w%), b) średnia aktywność roczna opadu promieniotwórczego w Polsce w latach 1962 - 1988 (%)

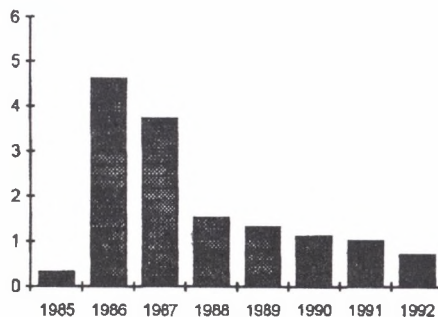


Rys. 3. Przeciętne wartości skażenia mleka jodem-131 w wybranych województwach od kwietnia do maja 1986 r. (w Bq/l)

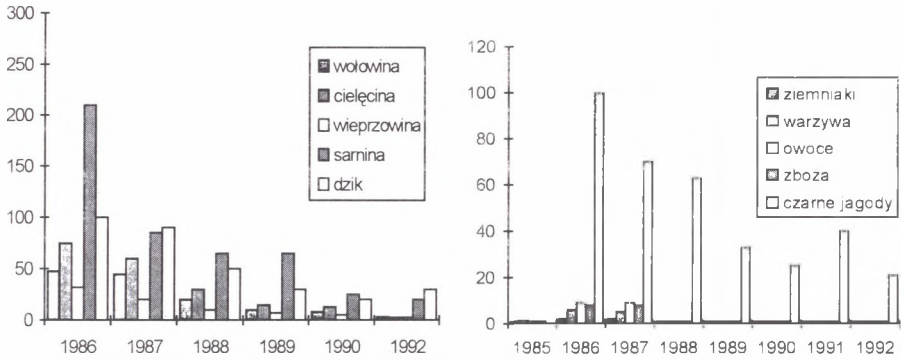
Województwa: 1. śląskie, 2. gdańskie, 3. koszalińskie, 4. suwalskie, 5. białostockie, 6. łomżyńskie, 7. olsztyńskie, 8. ostrołęckie, 9. ciechanowskie, 10. piłskie, 11. wrocławskie (krowa wypasana na pastwisku), 12. toruńskie, 13. bydgoskie, 14. poznańskie, 15. łódzkie, 16. warszawskie, 17. krośnieńskie, 18. legnickie.



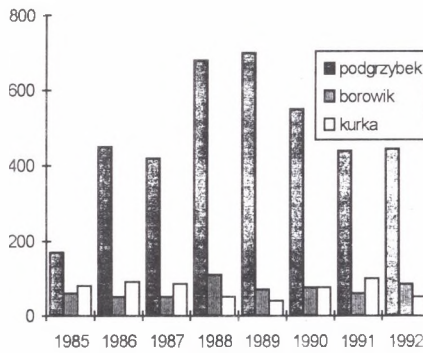
Rys. 4. Zawartość Cs-137 w mleku w Polsce w 1986 r.



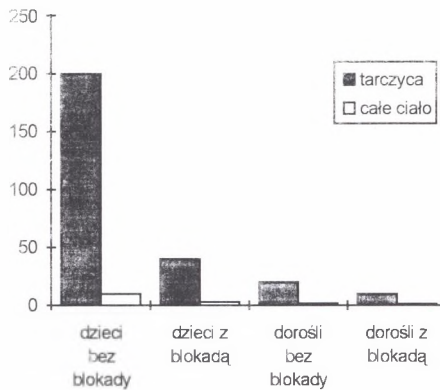
Rys. 5. Średnia zawartość cezu-137 i strontu-90 (w Bq/l) w mleku z terenu Polski w latach 1985-1992



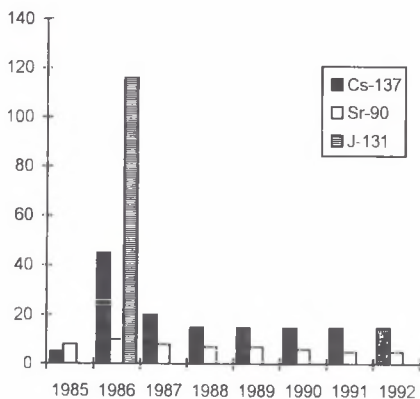
Rys. 6. Aktywność cezu-137 w diecie ludności Polski w latach 1985 - 1992 (w Bq/ kg)



Rys. 7. Zawartość Cs-134 i 137 w niektórych gatunkach grzybów w latach 1985 - 1992 (w Bq/kg)



Rys. 8. Redukcja dawki pochłoniętej przez tarczycę i całe ciało w wyniku zastosowania profilaktycznej blokady (w mSv)



Rys. 9. Średni efektywny równoważnik dawki od skażeń drogą pokarmową dla ludności Polski w latach 1985 - 1992 (w mSv)



Rys. 10. Średnie skażenie liści truskawek (w Bq/kg) w okresie maj - czerwiec 1986 r.

6. Koncentracja cezu w Polsce

Państwowy Instytut Geologiczny w ramach programu "Ochrona Litosfery" rozpoczął w 1990 r. prace w zakresie badań radioekologicznych. Za najważniejsze cele tych prac do 1995 roku uznano:

- wykonanie metodami gamma-spektrometrii map koncentracji na obszarze kraju radionuklidów naturalnych U-238, Th-232 i K-40, mapy dawki promieniowania gamma oraz mapy skażeń poczynobylskich cezem,
- rozpoczęcie badań emanacji radonowych ze środowiska geologicznego w Polsce.

W latach 1992- 1993 wykonano zdjęcie gamma-spektrometryczne Polski, obejmujące około 20 000 punktów pomiarowych. Pomiary wykonano w profilach o kierunku N-S, oddalonych od siebie o 17 km, przy kroku pomiarowym wynoszącym 1000 m i zagęszczeniu do 500 m, w obszarach o wysokich wskaźnikach kanału "Total". Szczególny opis metodyki pomiarów i ich interpretacji zamieszczono we wcześniejszych publikacjach (których w swojej pracy nie zamieszczam).

Przy badaniu rozkładu koncentracji radioaktywnych izotopów cezu-137+134 w Polsce, należy wziąć pod uwagę następujące czynniki:

- podstawowa część cezu została wprowadzona do środowiska w wyniku opadu po awarii czernobylskiej w kwietniu i maju 1986 r.,
- pewne ilości mogą być związane z wojskowymi próbami nuklearnymi, intensywnymi zwłaszcza w latach 1959 - 1962,
- rozkład regionalny opadu cezu był uzależniony od warunków meteorologicznych,
- kilkuletni okres, jaki upłynął od awarii do czasu podjęcia badań polowych spowodował, że rozkład zmienił się z rozkładu zbliżonego do powierzchniowego na rozkład przestrzenny, uzależniony od wielu czynników (rodzaj gruntu, jego przepuszczalność, pokrycie terenu).

Wyniki prac pomiarowych wskazują, że ponad 90% powierzchni kraju charakteryzują niskie koncentracje cezu, wahające się od 0 do 8 Bq/ m². Średnia koncentracja cezu obliczona dla obszaru Polski wynosi 4,67 kBq/ m², przy wartości odchylenia standardowego 5,51 kBq/m². Przyjmując umownie, że wartość średnia plus dwa odchylenia standardowe wyznacza koncentrację anomalną, przyjęto wartość izolinii 15 kBq/ m² jako wyznacznik obszarów anomalnych.

Najwyższe skażenia cezowe stwierdzono w południowo-zachodniej Polsce, we wschodniej części Przedgórze Sudeckiego i Niziny Śląskiej. Skażenia te stanowią część strefy podwyższonych wartości cezu o przebiegu z SW na NE, ciągnącej się od granicy polsko-czeskiej w Kotlinie Kłodzkiej po Warszawę. W strefie tej wyróżnić można trzy obszary anomalne:

- anomalia Opola zajmująca powierzchnię ok. 4500 km², położona na terenie województw wałbrzyskiego, opolskiego, częstochowskiego, charakteryzuje się najwyższymi koncentracjami cezu w Polsce, dochodzącymi w rejonie Nysy do 96 kBq/ m²,
- anomalia Radomska (woj. piotrkowskie) stwierdzona na N od miasta ma niewielki zasięg przestrzenny, wielkość koncentracji sięga tu 20 kBq/ m²,
- anomalia Warszawy rozciąga się pomiędzy Rawą Mazowiecką a Wołominem (woj. skierniewickie, stołeczne). Koncentracje cezu w rejonie Pruszkowa i Wesołej sięgają 30 kBq/ m².

Poza tą strefą stwierdzono następujące obszary skażeń:

- w południowej części kraju w Beskidzie Śląskim, Beskidzie Małym, Kotlinie Oświęcimskiej (woj. bielskie); koncentracje cezu sięgają tu 25 kBq/ m²,
- w Karkonoszach oraz zachodniej części kraju i Przedgórze Sudeckiego w rejonie Pieńska (woj. jeleniogórskie); koncentracje cezu sięgają 25 kBq/ m²,
- we wschodniej części kraju, na Wysoczyźnie Siedleckiej i Wysoczyźnie Bielska Podlaskiego; pomiędzy Kockiem, Siedlcami a Czeremchą (woj. siedleckie, białostockie, białsko - podlaskie) stwierdzono kilka niewielkich powierzchniowo pól, w których koncentracja cezu dochodzi do 50 kBq/ m². Kontynuację skażeń ku północnemu-wschodowi stanowią podobnej wielkości anomalie w Puszczy Kurpiowskiej (woj. ostrołęckie), m. in. w pobliżu Myszyńca oraz na Pojezierzu Mazursko-Mragowskim,
- pojedyncze występowanie cezu powyżej 15 kBq/ m², zanotowano w woj. szczecińskim pomiędzy Ińskiem a Maszawem i w woj. elbląskim w pobliżu Prabut.

Analiza średnich koncentracji cezu w poszczególnych województwach wykazuje wyraźnie, że zdecydowanie najwyższą średnią koncentracją cezu - 16,62 kBq/ m² charakteryzuje się woj. opolskie. Drugie w kolejności, woj. ostrołęckie, wykazuje już dwukrotnie niższą wartość średnią - 8,3 kBq/ m². W sumie w 20 województwach wielkość średnia koncentracji jest wyższa od średniej krajowej. Najniższe skażenie, poniżej 2 kBq/ m², zanotowano w województwie koszalińskim.

Średnie wartości koncentracji cezu w poszczególnych województwach porównano ze sobą testując analizą wariancji, hipotezę o równości średnich. Ponieważ hipoteza ta została odrzucona na 95% poziomie ufności, wydzielono grupy województw o statystycznie jednakowych średnich stosując rangową metodę porównań wielokrotnych Tukeya. W wyniku analizy utworzono 19 grup (rys. 11). Większość z nich cechuje się nieostryimi granicami, tzn. to samo województwo należy do kilku grup jednocześnie, jedynie grupa XIX, w skład której wchodzi tylko woj. opolskie, różni się wyraźnie od pozostałych.

Rozkład częstości koncentracji cezu w Polsce jest normalny i nie wykazuje poważniejszych zaburzeń. Jego klasa modalna mieści się w przedziale od 1,7 do 3,5 kBq/ m². Bardziej szczegółowa analiza, w której rozpatrywano rozkłady w poszczególnych województwach, wykazała jednak, że obserwowany rozkład koncentracji cezu w Polsce jest wynikiem nałożenia się co najmniej pięciu czynników przyrodniczych, co zadecydowało o zróżnicowaniu koncentracji cezu na terenie Polski. Brak wyraźnych związków pomiędzy zawartością cezu z jednej strony a typem gleby i rodzajem pokrycia terenu z drugiej strony wskazuje, że wszystkie te czynniki były czynnikami meteorologicznymi (zachmurzenie, mgły, opady itp.).

Szczegółową analizę rozkładu częstości koncentracji cezu oparto na danych pochodzących z 4 województw: koszalińskiego (najniższa koncentracja cezu), opolskiego i ostrołęckiego (najwyższe koncentracje cezu) oraz stołecznego (woj. to znajduje się na obszarze przecięcia dwóch kierunków stref anomalnych).

Rozkład częstości koncentracji cezu w woj. koszalińskim jest dwumodalny i lekko asymetryczny. Prawdopodobnie odzwierciedla on nałożenie się dwóch populacji: jednej o rozkładzie zbliżonym do normalnego i wartości średniej bliskiej 0,6 kBq/ m² i drugiej, również o rozkładzie zbliżonym do normalnego i wartości średniej bliskiej 3 kBq/ m². Pierwsza populacja odpowiada koncentracjom cezu w Czernobylu - efekty wojskowych prób z bronią jądrową w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych - druga natomiast jest wynikiem opadu pyłu radioaktywnego migrującego w wysokich warstwach atmosfery. Po zgeneralizowaniu rozkład ten staje się jednomodalny, zbliżony do normalnego i lekko dodatnio skośny. Jego klasa modalna mieści się w przedziale od 1,2 do 2,2 kBq/ m². Odzwierciedla on aktualne tło koncentracji cezu w Polsce.

Rozkład częstości koncentracji cezu w Polsce, w woj. stołecznym nie wykazuje podobieństwa do wcześniej omawianych rozkładów. Jest on wprawdzie dwumodalny i lekko asymetryczny (podobnie jak w przypadku woj. koszalińskiego), jednak jego klasy modalne mieszczą się w przedziałach od 5,2 do 7 i od 9,8 do 11,6 kBq/ m². Rozkład ten prawdopodobnie wynika z nałożenia się dwóch różnych populacji cezu, obu o rozkładach zbliżonych do normalnego i wartościach średnich bliskich odpowiednio 3,5 - 4 oraz 12 kBq/ m² (wartości obu populacji są nieco przesunięte względem klas modalnych z tego powodu, że w przypadku nałożenia się dwóch populacji następuje interferencja klas środkowych powodując zawyżenie obserwowanych częstości względem częstości rzeczywistych). Można przyjąć, iż pierwsza populacja powstała, podobnie jak w woj. koszalińskim, w wyniku opadu pyłu radioaktywnego migrującego w wysokich warstwach atmosfery, druga natomiast, w wyniku opadu pyłu radioaktywnego migrującego z rejonu Czernobyla w niskich warstwach atmosfery.

Rozkłady częstości koncentracji cezu w woj. ostrołęckim i opolskim są silnie zaburzone, wielomodalne i silnie dodatnioskośne. W obu województwach najsilniej zaznacza się klasa obserwacji mieszcząca się w przedziale 3 - 4 kBq/ m² i odpowiadająca aktualnemu tłu geochemicznemu cezu. Ponadto w obu województwach obserwuje się populację o średniej wartości bliskiej 20 kBq/ m², a w woj. opolskim dodatkowo niewielką populację o wartości średniej bliskiej 84 kBq/ m². Rozkłady częstości tych populacji nie są zbyt dobrze określone. Można przyjąć, iż powstały one w wyniku opadów deszczu z pyłem radioaktywnym. Intensywność opadu wpływała na wielkość i zasięg depozycji cezu.

Dane o przemieszczaniu się skażonych mas powietrza oraz wyniki prac pomiarowych pozwalają na sprecyzowanie następujących wniosków:

1. W ciągu pierwszych 30 godzin po awarii masy skażonego powietrza przesuwały się z Czernobyla w kierunku północno-zachodnim i nie objęły obszaru Polski. Dowodem na to są bardzo niskie skażenia we wschodniej części województw suwalskiego i białostockiego.

2. W następnych dniach (po 27 kwietnia 1986 r.) kierunek przemieszczania się mas skażonego powietrza zmienił się na bardziej zachodni i dotarły one nad obszar Polski. Z badań PIG-u wynika, że w okresie tym skażone powietrze wtargnęło na teren Polski poprzez Podlesie - woj. siedleckie, białkopodlaskie, północny skraj woj. lubelskiego i południowy - białostockiego. Następnie masa powietrza wędrowała w kierunku NW poprzez wschodnią

część Mazowsza (woj. ostrołęckie, łomżyńskie) i dotarła do Pojezierza Olsztyńsko-Mragowskiego. Wielkość dyspozycji cezu z tych mas powietrza nie była wysoka. Maksymalne koncentracje (70 kBq/m^2) stwierdzono w rejonie Czeremchy, przeciętnie są one niższe, rzędu $15 - 25 \text{ kBq/m}^2$. Anomalie mają charakter niewielkich terytorialnie plam, a na większości obszaru koncentracje cezu wahają się od 8 do 15 kBq/m^2 . Takie wielkości skażeń wynikają z lokalnych warunków pogodowych, występowania opadów i mgieł.

3. Zmiana warunków meteorologicznych spowodowała zmianę kierunku przesuwania się skażonych mas powietrza na południowo-zachodni. W dniach 30 kwietnia i 1 maja 1986 r. sięgnęła ona nad południowo-zachodnie obszary Polski, Czechy i południowe Niemcy, powodując na całym tym terenie skażenie cezem. Ich wielkość zależała od lokalnych warunków pogodowych, zwłaszcza warunków i intensywności opadów. Na Opolszczyźnie wielkość koncentracji Cs osiągnęła 100 kBq/m^2 , a w Bawarii 40 kBq/m^2 . Taka interpretacja znajduje potwierdzenie w pomiarach zmian aktywności beta powietrza.

Z przeprowadzonych przez Państwowy Instytut Geologiczny prac wynika, że zasięg skażeń długowiecznymi izotopami cezu jest dużo mniejszy niż sugerowały to publikowane informacje. Około 90% powierzchni kraju zostało skażone w minimalnym stopniu przez opad cezu z górnych warstw atmosfery, nie mający znaczenia dla wielkości dawki promieniowania.

Skażenia istotne, wymagające dalszych prac badawczych występują przede wszystkim na Opolszczyźnie.

W ramach programów badawczych PIG-u planowane są tam szczegółowe prace kartograficzne w skali $1 : 100\ 000$, badania koncentracji cezu w glebach i jego przemieszczania przestrzennego. W strefach najwyższych skażeń badane będą zawartości cezu w roślinach użytkowanych rolniczo. Badania te będą prowadzone wspólnie z Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

7. Elektrownie jądrowe - stosować czy likwidować?

Obecnie około 15% energii elektrycznej na świecie wytwarza się w elektrowniach jądrowych, a w Europie ok. 30%. Gdyby cała światowa energia elektryczna była produkowana tylko przez elektrownie jądrowe, to roczna dawka promieniowania otrzymana przez

przeciętne go mieszkańca planety wynosiłaby 1,8 mSv. Tak znikoma dawka nie mogłaby spowodować żadnych wykrywalnych zmian zdrowotnych w społeczeństwie. Natomiast łatwo wyobrazić sobie, jakie korzystne skutki przyniosłaby całkowita eliminacja elektrowni węglowych, a także innych źródeł energii opartych na paliwach kopalnianych. W Polsce byłaby to likwidacja emisji 1,8 mln ton dwutlenku siarki ("Rocznik Statystyczny", 1987) i 300 mln ton CO₂ rocznie. Oznacza to usunięcie przyczyny co najmniej kilku tysięcy zgonów rocznie, powodowanych w Polsce przez pyły i tlenki siarki z elektrowni węglowych, usunięcie głównych przyczyn wymierania lasów w Europie Środkowej, giniecia ryb w jeziorach oligotroficznym, a w skali biosfery - usunięcie głównej przyczyny efektu cieplarnianego i groźby planetarnych zmian klimatu, wiodących do stopienia lodowców i niekorzystnych zmian geografii upraw rolnych.

Od początku XIX w. zaczęliśmy spalać coraz większą ilość paliw kopalnianych i drewna. Pozostały ze spalania dwutlenek węgla gromadzi się w atmosferze i obecnie jest go o 25% więcej niż było, zanim zaczęliśmy budować przemysł i masowo wycinać lasy. Węgla wystarczy może na potrzeby ludzkości jeszcze na ok. 150 - 300 lat, ropy naftowej na 30 lat, a gazu na 55 lat. Uranu dla elektrowni atomowych zawartego w bogatych złożach wystarczy na ok. 900 lat, a ze złóż uboższych (co zwiększyłoby koszt elektryczności o ok. 1%) na ponad 100 000 lat. Gdyby ze względu na wyczerpanie się paliw kopalnianych (które jako surowce chemiczne wystarczyłyby przyszłym pokoleniom na miliony lat) ludzkość nie przestawiła się na atomowe źródła energii, to obecny poziom CO₂ w atmosferze uległby podwojeniu już ok. roku 2050.

Według oceny Komitetu Naukowego Narodów Zjednoczonych ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR) normalna praca elektrowni jądrowych i pozostałej części nuklearnego cyklu paliwowego praktycznie nie powoduje narazenia ludności i tylko znikome skażenie środowiska.

Z tego powodu należy uznać tę formę produkcji energii za najkorzystniejszą z punktu widzenia ochrony zdrowia ludzi, ekosystemów lokalnych i całej biosfery (UNSCEAR, 1988).

Jednakże wielu ludzi może kwestionować tę wypowiedź, wspominając wypadek w Czernobylu. Lecz rzecz nie w konstrukcji. Postaram się to wyjaśnić na przykładzie. Kiedy ktoś prowadzi samochód i przekręca kierownicę nie w tę stronę - następuje katastrofa! Czy to silnik

WOJEWÓDZTWO	G R U P A																		
	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	
KOSZALIŃSKIE																			
ZAMOJSKIE																			
LESZCZYŃSKIE																			
SIERADZKIE																			
KONWSKIE																			
GDARSKIE																			
RZESZOWSKIE																			
PRZEMYSKIE																			
WŁOCŁAWSKIE																			
PŁOCKIE																			
BYOGOSKIE																			
TARNOWSKIE																			
PILSKIE																			
KROŚNIENSKIE																			
POZNAŃSKIE																			
SZCZECIŃSKIE																			
GÓRZÓWSKIE																			
LEGNICKIE																			
SŁUPSKIE																			
KALIŃSKIE																			
TORUŃSKIE																			
CHEŁMSKIE																			
ZIELONOGÓRSKIE																			
NOWOSĄDECKIE																			
WROCŁAWSKIE																			
KIELECKIE																			
CIECHANOWSKIE																			
ELBLĄSKIE																			
JELENIÓGÓRSKIE																			
LUBELSKIE																			
PIOTRKOWSKIE																			
RADOMSKIE																			
TARNOBRZESKIE																			
BIAŁOSTOCKIE																			
SUWAŃSKIE																			
KRAKOWSKIE																			
ŁÓDZKIE																			
BIELSKIE																			
KATOWICKIE																			
ŁÓDŹYŃSKIE																			
WARSZAWSKIE																			
OLSZTYŃSKIE																			
BIELSKOPODLASKIE																			
WAŁBRZYSKIE																			
SKIERMEWICKIE																			
SIEDLECKIE																			
CZĘSTOCHOWSKIE																			
OSTRÓLĘCKIE																			
OPOLSKIE																			

Rys. 11. Przedziały ufności dla grup województw o statystycznie jednakowych średnich wyznaczone metodą Tukeya

zawinił? albo konstruktor samochodu? Każdy odpowie: "Zawinił niewykwalifikowany kierowca".

Wielu naukowców uważa, że bezpieczeństwo elektrowni jądrowych wzrośnie przez umieszczanie ich pod ziemią. Jednak bez względu na to, gdzie by były umieszczane, to mogą wystąpić wady natury technicznej, jak np. niedostateczna wytrzymałość szwów w zasuwach, rurach i innych instalacjach.

Dlatego osobiście jestem przede wszystkim za wykorzystaniem energii niekonwencjonalnej, jak np. energia słoneczna, wiatru, pływów morskich, geotermiczna i inne, pomimo iż specjaliści twierdzą, że te źródła energii są zbyt małe.

Jednakże nie neguję produkcji energii atomowej, gdyż z punktu widzenia ochrony środowiska ma jedną ważną zaletę (o której już wspomniałem) - nie wytwarza gazów powodujących efekt cieplarniany, w przeciwieństwie do paliw kopalnianych. Powstawanie popiołów, pyłów wylatujących z kominów i gazów, a z nich najgroźniejszych - SO_2 i CO_2 , jest wynikiem rozpowszechnienia elektrowni węglowych.

Tabela 3

Roczne zużycie paliwa i tlenu
oraz odpady usuwane w ciągu roku
z elektrowni węglowej i jądrowej o mocy 1000 MW

	Elektrownia węglowa	Elektrownia jądrowa
Zużycie paliwa (tony)	3,5 miliona	27,2
Transport paliwa (wagony 56 t)	62 500	0,5
zużywanie tlenu (t)	6,5 miliona	0
Odpady usuwane do atmosfery (t):		
CO ₂	7,8 miliona	0
SO ₂	39 800	0
NO ₂	9 400	0
Pył	75 000	0
Odpady usuwane na składowiska (m ³)	400 000	500

Czernobyl stał się ważną choć bolesną lekcją dla całej ludzkości. Zmusił do przemyślenia na nowo strategii rozwoju światowej energetyki, doprowadził do podjęcia szeregu działań zwiększających bezpieczeństwo pracy elektrowni jądrowych, obudził "świadomość atomową" społeczeństw. Potwierdził też potrzebę istnienia organizacji ponadnarodowych, właśnie takich jak wyspecjalizowane agendy ONZ, których użyteczność często dotąd kwestionowano, a które jak to pokazuje przykład IAEA, mogą stać się doskonałym forum wymiany wiedzy i wzajemnej pomocy międzynarodowej.

Awaria czernobylska przypomina też wszystkim wydającym decyzje mające konsekwencje ekologiczne o ich odpowiedzialności wobec ludzi, na których losy decyzje te mogą wpłynąć. Wskazuje również, że rola społeczeństwa w akceptacji takich decyzji nie powinna być bierna.

OBJAŚNIENIA SYMBOLI

Gy (gray) - jednostka dawki promieniowania jonizującego pochłoniętego w materii (J / kg).

Sv (sivert) - jednostka równoważnika dawki promieniowania jonizującego uwzględniająca różnice skuteczności biologicznej różnych rodzajów promieniowania (J / kg).

Bq (becquerel) - jednostka aktywności substancji promieniotwórczej, równa jednemu rozpadowi atomu na sekundę.

LD 50 - połowiczna dawka śmiertelna promieniowania lub substancji trującej, po której zginie 50% narażonej populacji.