



## The radiological situation before and after Chernobyl disaster

Marcin Leoniak, Anna Zonenberg, Wiesław Zarzycki

Department of Endocrinology, Diabetology and Internal Medicine, Białystok Medical University, Poland

### Abstract

The nuclear reactor accident, which occurred on 26 April 1986 at Chernobyl, has been one of the greatest ecological disasters in human history. In our study we discussed the most recent data on the accident, and the natural and synthetic sources of radiation. According to the recent data, the air at Chernobyl had been contaminated with about 5300 PBq radionuclide activity (excluding rare gases), including 1760 PBq  $^{131}\text{I}$  and 85 PBq  $^{137}\text{Cs}$ . The highest radiation received by the liquidators (0.8–16 Gy), lower doses were received by the population which was evacuated or inhabited the contaminated areas (in which the level of  $^{137}\text{Cs}$  activity deposited in the earth was 37 kBq/m<sup>2</sup>). In the European countries the highest mean radiation dose per year for the whole body in the first year after the accident was in Bulgaria (760  $\mu\text{Sv}$ ), Austria (670  $\mu\text{Sv}$ ) and Greece (590  $\mu\text{Sv}$ ), while the lowest radiation dose was observed in Portugal (1.8  $\mu\text{Sv}$ ) and Spain (4.2  $\mu\text{Sv}$ ). In Poland the mean effective equivalent dose resulting from Chernobyl accident was 932  $\mu\text{Sv}$  and

is close to the limited dose permitted in Poland, equalling 1 mSv/year. The highest radiation dose to thyroid was received by inhabitants of the states previously known as Bielskopodlaskie, Nowosadeckie and the north-east region of Poland. Lowest dose was received by inhabitants of the areas previously known as Slupski and Rzeszowski.

(*Pol J Endocrinol* 2006; 1 (57): 45–52)

**Key words:** Chernobyl disaster, radioactive contamination



Anna Zonenberg, M.D.  
Department of Endocrinology, Diabetology and Internal  
Medicine, Białystok Medical University  
ul. M. Curie-Skłodowskiej 24a, 15–276 Białystok, Poland  
tel. (085) 746 86 07, (085) 746 86 77  
e-mail: zonenbergab@poczta.onet.pl

## Sytuacja radiologiczna w czasie i po awarii w Czarnobylu

Marcin Leoniak, Anna Zonenberg, Wiesław Zarzycki

Klinika Endokrynologii, Diabetologii i Chorób Wewnętrznych Akademii Medycznej, Białystok

### Streszczenie

Największa katastrofa ekologiczna w historii ludzkości — wybuch w elektrowni jądrowej w Czarnobylu — nastąpiła 26 kwietnia 1986 roku. W niniejszej pracy omówiono dostępne dane na temat tego zdarzenia, na tle innych naturalnych i sztucznych źródeł promieniowania. Według najnowszych danych do atmosfery przedostało się około 5300 PBq całkowitej aktywności radionuklidów, wyłączając gazy szlachetne, w tym około 1760 PBq  $^{131}\text{I}$  i 85 PBq  $^{137}\text{Cs}$ . Największe dawki promieniowania otrzymali „likwidatorzy” (0,8–16 Gy), trochę mniejsze — ludność ewakuowana i zamieszkująca skażone tereny. Wśród krajów europejskich oddalonych od miejsca zdarzenia średnia roczna dawka promieniowania na całe ciało w pierwszym roku po awarii największa była w Bułgarii (760  $\mu\text{Sv}$ ), Austrii (670  $\mu\text{Sv}$ ) i Grecji (590  $\mu\text{Sv}$ ), natomiast najniższa w Portugalii (1,8  $\mu\text{Sv}$ ) i Hiszpanii (4,2  $\mu\text{Sv}$ ). W Polsce efektywny równoważnik dawki obciążającej w wyniku awarii w Czarnobylu szacowano średnio na 932  $\mu\text{Sv}$

i był on zbliżony do dawki granicznej obowiązującej na terenie kraju, która wynosi 1 mSv/rok. Duże dawki napromieniowania tarczycy otrzymali mieszkańcy byłego województwa białkopodlaskiego, nowosadeckiego oraz z regionu północno-wschodniej Polski. Najmniejsze zaś mieszkańcy byłego województwa slupskiego i rzeszowskiego.

(*Endokryinol Pol* 2006; 1 (57): 45–52)

**Słowa kluczowe:** katastrofa w Czarnobylu, skażenie promieniotwórcze



Dr med. Anna Zonenberg  
Klinika Endokrynologii Diabetologii  
i Chorób Wewnętrznych Akademii Medycznej  
ul. M. Curie-Skłodowskiej 24a, 15–276 Białystok  
tel. (085) 746 86 07, (085) 746 86 77  
e-mail: zonenbergab@poczta.onet.pl

## Wstęp

W dniu 15 grudnia 2000 roku cały świat odetchnął z ulgą — rozbrojono „tykającą zegarową bombę atomową”, której eksplozji już raz nie udało się zapobiec — ostatni działający blok elektrowni atomowej w Czarnobylu został zamknięty.

Czarnobyl to niewielkie miasteczko leżące w północnej części Ukrainy 20 kilometrów od granicy z Białorusią, do 1986 roku znane jedynie okolicznym mieszkańcom. W dniu 26 kwietnia 1986 roku o godzinie 1.23 czasu moskiewskiego w tutejszej elektrowni atomowej w czasie przeprowadzania doświadczenia polegającego na stopniowym zmniejszaniu mocy reaktora numer 4, w wyniku serii ludzkich błędów i wad konstrukcyjnych reaktora, nastąpił szereg eksplozji. Reaktory Czarnobyla (RBMK-1000) miały istotną wadę: były niestabilne przy pracy z małą mocą. Aby doświadczenie mogło się powieść, wyłączono większość automatycznych systemów zabezpieczeń. Jednak gdy zachodząca reakcja wymknęła się spod kontroli, na włączenie systemów zabezpieczających było już za późno. Moc reaktora wzrosła ponad 100-krotnie, co spowodowało wzrost temperatury rdzenia do około 2000°C. Doprowadziło to do dwóch eksplozji (rozsadzenie układu chłodzenia przez parę wodną i wybuch mieszaniny pochodzącej z rozkładu wody na wodór i tlen pod wpływem kontaktu z rozżarzonymi materiałami konstrukcyjnymi, np. grafitem i cyrkonem). Wewnątrz rdzenia znajdowało się 1500 ton łatwopalnego grafitu i to on wywołał pożar i wybuch chemiczny [1].

Wybuch w Czarnobylu nazywany jest często „największą katastrofą spowodowaną przez człowieka” lub „najpoważniejszą katastrofą ekologiczną w historii ludzkości”. Określenia te, jakkolwiek słuszne, należy rozpatrywać bardziej w kategoriach psychologicznych i ekonomicznych. Jeszcze w 1987 roku podawano przerażające perspektywy liczby zgonów z powodu nowotworów powstałych na skutek wybuchu, których liczbę szacowano na 5100 do 100 000 lub że w ciągu następnych 70 lat w wyniku skutków awarii nastąpi aż 9,5 miliona zgonów [2].

Ówczesni eksperci radzieccy oceniali straty poniesione na skutek awarii na 2 biliony rubli [3]. Dzisiaj już wiadomo, że są one liczone w miliardach dolarów. Tylko w latach 1986–1991 było ZSRR na usuwanie skutków awarii wydało 18 miliardów dolarów [4].

Biorąc pod uwagę ilość substancji promieniotwórczych wyemitowanych do środowiska, wybuch w Czarnobylu ustępuje miejsca próbom z bronią atomową prowadzonym głównie przez Stany Zjednoczone (testy w Nevadzie, Atolu Bikini na Wyspach Marshalla) i ZSRR (Nowaja Semlija) w latach 50. i 60. Na przykład emisja  $^{131}\text{I}$  (jod) z czarnobylskiego reaktora wynosiła 1,2–1,7 EBq

(1 EBq, *eksabekkerel* =  $10^{18}$  Bq) i była 180 razy mniejsza niż w wyniku prób nuklearnych przeprowadzonych w rekordowym pod tym względem 1962 roku [5].

W ciągu kilku tygodni od wypadku zanotowano 30 zgonów (w tym 28 spowodowanych ekspozycją na promieniowanie jonizujące) [6]. Liczba ta wydaje się niewielka wobec innych katastrof XX wieku, na przykład wycieku trującego gazu w 1984 roku w Bhopal (Indie), w wyniku którego śmierć poniosły 6954 osoby, czy wybuchu pyłu węglowego w 1942 roku w kopalni Honkeiko (Chiny), gdzie zginęły 1572 osoby.

Wypadek w elektrowni czarnobylskiej nie był jedynym, który spowodował uwolnienie izotopów promieniotwórczych do otoczenia. W Windscale (Wielka Brytania) 10 października 1957 roku w wyniku awarii część zawartości rdzenia reaktora przedostała się do środowiska. Szacuje się, że uwolnionych zostało dwa razy więcej promieniotwórczych gazów szlachetnych i dwa tysiące razy mniej (20 000 Ci)  $^{131}\text{I}$  w porównaniu do katastrofy w Czarnobylu. Pechowy był także 1961 rok, w którym 3 stycznia doszło do awarii w Idaho Falls (USA), a w późniejszym okresie podobna awaria miała miejsce na pokładzie radzieckiego okrętu o napędzie atomowym. Inna awaria nastąpiła w Three Mile Island (USA) 28 marca 1979 roku. Podobnie jak ta w kwietniu 1986 roku, została spowodowana przez błąd człowieka, jednak miała o wiele mniejsze konsekwencje, gdyż do atmosfery przedostało się tylko 17 Ci  $^{131}\text{I}$  i 2% gazów szlachetnych w porównaniu do uwolnionych w Czarnobylu [7–9]. Podczas przygotowywania paliwa do reaktora 30 września 1999 roku w Tokaimura (Japonia) doszło do przypadkowego wywołania nuklearnej reakcji łańcuchowej. W latach 1944–1957 w Hanford (USA) z zakładów produkujących pluton dla potrzeb militarnych do atmosfery przedostało się, według różnych danych, od 472 597 Ci do 527 191 Ci  $^{131}\text{I}$  [10]. Skutki zdrowotne tej tragedii opisano w specjalnym raporcie *Hanford Thyroid Disease Study Final Report* opublikowanym w czerwcu 2002 roku [10].

Większość ekspertów uważa, że wypadku w elektrowni czarnobylskiej nie można porównać do dobrze znanych kataklizmów, takich jak powodzie, pożary, trzęsienia ziemi, które od setek lat nękają ludzkość. Jest to zjawisko zupełnie nowego typu dotyczące nie tylko terenów, na których nastąpiła eksplozja, ale także obszarów oddalonych o dziesiątki tysięcy kilometrów. Jego następstwami były długotrwałe skażenie gleby, wody i powietrza, przesiedlenia tysięcy osób (w 1986 r. ewakuowano 116 000 osób z terenów otaczających elektrownię, a po 1986 r. przesiedlono 220 000 ludzi) [1] oraz skutki zdrowotne dotyczące nie tylko osób żyjących na skażonych terenach, ale także wielu przyszłych pokoleń. Wystarczy powiedzieć, że na samej tylko Ukrainie, Białorusi i Rosji w wyniku katastrofy w Czarnobylu, według ONZ i UNICEF, ucierpiało 7 103 630 osób [4].

## Naturalne i sztuczne źródła promieniowania

Organizm ludzki jest nieustannie poddawany działaniu promieniowania jonizującego. Każdy człowiek na Ziemi w 2000 roku otrzymał średnią dawkę promieniowania o wartości zbliżonej do 2,8072 mSv (milisiwertów). Na tę ilość składa się: promieniowanie tła, diagnostyczne i lecznicze procedury medyczne, testy z bronią jądrową, produkcja energii w elektrowniach atomowych.

Głównym źródłem promieniowania jest promieniowanie tła, którego średnia globalna dawka roczna wynosi 2,4 mSv [1], na co składają się: promieniowanie kosmiczne (0,4 mSv), promieniowanie pierwiastków promieniotwórczych obecnych w glebie i skałach (0,5 mSv), inhalacje, głównie Rn (radonu) (1,2 mSv) oraz spożywanie  $^{40}\text{K}$  (potas) z pożywieniem (0,3 mSv) [1]. Jednak w niektórych miejscach kuli ziemskiej, gdzie występują duże naturalne złoża uranu, toru i potasu lub gleby wulkaniczne, dawki te są znacznie większe, na przykład w Ramsar (Iran) — 260 mSv/rok oraz na plażach Brazylii — 790 mSv/rok [11]. Co roku ludzkie gonady, płuca i szpik kostny otrzymują z naturalnych źródeł promieniowania dawki odpowiednio: 0,772 mGy, 1,125 mGy i 0,913 mGy [12].

Drugim pod względem wielkości źródłem promieniowania są diagnostyczne i lecznicze procedury medyczne — średnia ogólnoswiatowa dawka wynosi 0,4 mSv/rok [1]. Największy udział, bo aż 99%, w zabiegach diagnostycznych mają prześwietlenia rentgenowskie, w tym aż 21% — dentystyczne prześwietlenia promieniami X, a tylko 1% — medycyna nuklearna. Wśród działań leczniczych 90% stanowi brachyterapia [1].

Dodatkowa ekspozycja na promieniowanie jonizujące wiąże się z uwolnieniem do atmosfery dużej ilości pierwiastków promieniotwórczych podczas testów z bronią jądrową, których w latach 1945–1980 przeprowadzono kilkaset. Średnia globalna dawka promieniowania pochodzącego z tego źródła to 0,005 mSv/rok [1].

Kolejnym źródłem promieniowania jest produkcja energii jądrowej. W 1998 roku pracowało na świecie 437 elektrowni jądrowych, a w budowie znajdowało się kolejnych 35 reaktorów, co jedynie w niewielkim stopniu (o 0,0002 mSv/rok) podnosi średnią ogólnoswiatową dawkę efektywną [1].

Wypadek w elektrowni atomowej w Czarnobylu powiększył globalną dawkę promieniowania jonizującego na jednego mieszkańca świata zaledwie o 0,002 mSv [1].

Pisząc o źródłach promieniowania, warto także wspomnieć o pyłach dymnicowych i żużlach piecowych powstałych w wyniku spalania węgla i wytopienia minerałów, a także lamp oscyloskopowych (np. kineskopy telewizorów) czy farb stałego świecenia.

## Skład i ilość uwolnionych radionuklidów w czasie awarii w Czarnobylu

W ciągu pierwszego dnia po wybuchu, w wyniku mechanicznych uszkodzeń reaktora, do środowiska przedostało się 25% całkowitej ilości uwolnionych radionuklidów, w tym większość gazów szlachetnych i  $^{131}\text{I}$ . W ciągu następnych 5 dni nastąpił 6-krotny, w porównaniu z pierwszym, spadek emisji pierwiastków, ponieważ śmigłowce zrzuciły na rdzeń reaktora 5000 ton gliny, dolomitów i innych substancji. Kolejny wzrost uwalniania radionuklidów z uszkodzonego reaktora nastąpił od 7. do 10. dnia po wypadku. Kilka dni po wybuchu — 6 maja 1986 roku — emisja izotopów gwałtownie spadła do 1% początkowych wartości na skutek opanowania pożaru [13]. Fakt długotrwałego i zróżnicowanego okresu uwalniania izotopów promieniotwórczych, szczególnie  $^{131}\text{I}$ , przemawia za słuszością zastosowania profilaktyki jodowej w terminach późniejszych [14, 15].

Dokładne oszacowanie ilości radionuklidów uwolnionych podczas 10-dniowego okresu emisji pierwiastków z uszkodzonego reaktora elektrowni w Czarnobylu nie jest możliwe. Opublikowane na przestrzeni dekady od wypadku wyniki badań przeprowadzonych przez ekspertów z wielu krajów (m.in. USA, byłego ZSRR, Wielkiej Brytanii, Francji, Kanady), mimo że w wielu punktach zgodne, w kilku innych wykazują znaczne rozbieżności, na przykład emisja  $^{239}\text{Np}$  (neptun) według badań ekspertów z byłego ZSRR wyniosła 0,113 MCi (1 MCi, megacurie =  $10^6$  Ci), brytyjskich — 1,188 MCi, a amerykańskich — aż 3 MCi [16].

Z radiologicznego punktu widzenia największe zagrożenie dla populacji kilka dni po wypadku miała emisja jodu-131, następnie radioaktywność baru ( $^{140}\text{Ba}$ ), ceru ( $^{141}\text{Ce}$ ), rutenu ( $^{103}\text{Ru}$ ), cyrkonu ( $^{95}\text{Zr}$ ). W 2000 roku największą aktywność wykazywały pierwiastki o długim okresie półtrwania: cez ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ), stront ( $^{90}\text{Sr}$ ), pluton ( $^{239}\text{Pu}$ ) [16]. Wyniki systematycznych pomiarów aktywności  $^{90}\text{Sr}$  w mleku przeprowadzone w Chorwacji w latach 1961–2001 nie potwierdzają tego, ponieważ katastrofa w Czarnobylu spowodowała wyższą aktywność  $^{90}\text{Sr}$  w mleku i glebie jedynie w 1986 roku [17]. Ważniejsze izotopy uwolnione w wyniku wypadku w elektrowni jądrowej w Czarnobylu przedstawiono w tabeli I [5, 18–20].

Pierwsze szacunkowe dane przygotowane przez ekspertów radzieckich w krótkim czasie po wypadku określały aktywność uwolnionych izotopów promieniotwórczych na 50 MCi, w tym 7,3 MCi  $^{131}\text{I}$  i 2,0 MCi innych izotopów jodu [21]. Niezależny autor Bonte szacuje ją na 40 MCi  $^{131}\text{I}$ , 50 MCi  $^{133}\text{Xe}$  i 3 MCi  $^{137}\text{Cs}$  (1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq) [22].

Tabela I

Ważniejsze izotopy uwolnione w wyniku wypadku w elektrowni jądrowej w Czarnobylu

Table I

More important isotopes released during the Chernobyl disaster of nuclear reactor

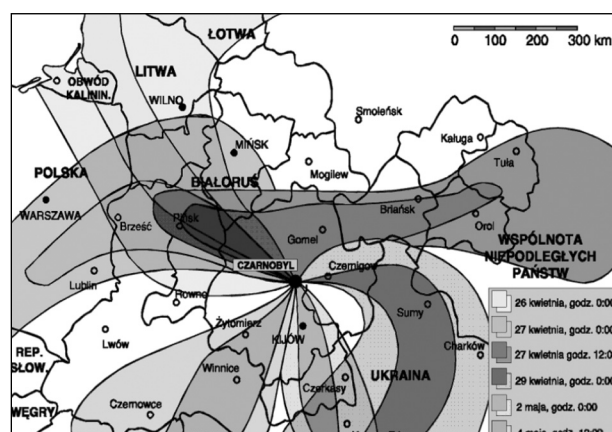
Izotop	Czas połowicznego rozpadu	Emitowane promieniowanie	Aktywność uwolnionego izotopu
<sup>85</sup> Kr (krypton)	10,72 l	Beta, gamma	33
<sup>133</sup> Xe (ksenon)	5,25 d		6500
<sup>132</sup> Te (tellur)	3,26 d	Beta, gamma	~1150
<sup>131</sup> I (jod)	8,04 d	Beta, gamma	1760
<sup>133</sup> I (jod)	20,8 h	Beta, gamma	
<sup>134</sup> Cs (cez)	2,06 l	Beta, gamma	~54
<sup>137</sup> Cs (cez)	30,0 l	Beta, gamma	~85
<sup>90</sup> Sr (stront)	29,12 l	Beta	~10
<sup>239</sup> Pu (pluton)	24 065 l	Alfa	0,03
<sup>140</sup> Ba (bar)	12,7 d		240
<sup>141</sup> Ce (cer)	32,5 d	Beta, gamma	196
<sup>103</sup> Ru (ruten)	39,3 d	Beta, gamma	> 168
<sup>95</sup> Zr (cyrkon)	64,0 d	Beta, gamma	196

Raport *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) z 1988 roku określa aktywność w rdzeniu reaktora <sup>131</sup>I i <sup>137</sup>Cs w chwili wybuchu odpowiednio na 1300 PBq (1 PBq, *petabekerele* = 10<sup>15</sup> Bq) i 290 PBq. Do atmosfery zostało uwolnione 20% <sup>131</sup>I i 13% <sup>137</sup>Cs, w przeliczeniu na bekerele — 260 PBq <sup>131</sup>I i 37,7 PBq <sup>137</sup>Cs. Całkowita aktywność izotopów uwolnionych w czasie wypadku (bez gazów szlachetnych) wyniosła 1000–2000 PBq [6]. W świetle badań przedstawionych w raporcie UNSCEAR 2000 aktywność w rdzeniu reaktora <sup>131</sup>I i <sup>137</sup>Cs wynosiła 3200 PBq i 260 PBq, z czego 1760 PBq <sup>131</sup>I i około 85 PBq <sup>137</sup>Cs weszło w skład „chmury czarnobylskiej”. Radioaktywne gazy szlachetne: <sup>133</sup>Xe (ksenon) i <sup>85</sup>Kr (krypton) praktycznie w całości wydostały się z paliwa reaktora. Do atmosfery przedostało się 5300 PBq całkowitej aktywności pierwiastków promieniotwórczych, wyłączając gazy szlachetne [1].

### Skażenie środowiska i dawki przyjęte przez ludność

Powstała po wybuchu radioaktywna chmura przemieszczała się zgodnie z kierunkiem dominujących wiatrów. Początkowo przesunęła się nad Szwecję i Finlandię, następnie nad Europę Środkową, a w późniejszym czasie nad Francję, Belgię, Holandię, Wielką Brytanię i kraje bałkańskie (ryc. 1). W pierwszym tygodniu maja 1986 roku promieniotwórczo skażone masy powietrza wykryto nad Chinami, Japonią, Stanami Zjednoczonymi i Kanadą [6].

Ludność Białorusi, Rosji i Ukrainy poddana działaniu promieniowania jonizującego w wyniku wypadku w Czarnobylu została podzielona przez UNSCEAR na 3 grupy: robotnicy pracujący na terenie elektrowni i w jej okolicach po wypadku („likwidatorzy”), ludność ewakuowana i ludność zamieszkująca skażone tereny [1]. Dokładne dane na temat dawek napromieniowania ludności tych grup zawiera raport UNSCEAR 2000, którego kolejne aneksy są cytowane w niniejszej pracy.



Rycina 1. Przemieszczanie się skażonych promieniotwórczo mas powietrza po wybuchu w elektrowni w Czarnobylu w dniach 26.04.–04.05.1986

Figure 1. Spread of radioactive contamination through the air after the Chernobyl disaster of nuclear reactor from 26.04 to 04.05.1986

Największe dawki promieniowania otrzymało około 600 osób (pracownicy elektrowni, strażacy, personel medyczny), którzy jako pierwsi usuwali skutki awarii. Rozpoznanie ostrej choroby popromiennej potwierdzono u 134 osób. Dawkę promieniowania na całe ciało od 0,8 do 2,1 Gy otrzymało 41 z nich, od 2,2 do 4,1 Gy — 50 osób, od 4,2 do 6,4 Gy — 22 osoby, a 21 chorych zostało naświetlonych dawką 6,5–16 Gy [23]. Średnia dawka promieniowania otrzymanego na szpik kostny wyniosła 0,036 Gy [24].

W latach 1986–1990 około 600 000 osób pracowało na terenie i w strefie otaczającej elektrownię [1]. Dokładne oszacowanie dawek napromieniowania było utrudnione z powodu niewystarczającej liczby indywidualnych dozymetrów [25]. Wielkość średniej rocznej dawki dla tej grupy osób w 1986 roku wynosiła 170 mSv, w 1987 roku — 130 mSv, w 1988 roku — 30 mSv, a w 1989 roku — 15 mSv [26–28]. Zgodnie z innymi szacunkami 25 000 „likwidatorów” pracujących bezpośrednio po wypadku i na początku 1987 roku otrzymało dawki nieprzekraczające 700 mGy promieniowania zewnętrznego, a pozostałe ponad pół miliona pracujących w późniejszym czasie otrzymało średnio 100 mGy [29].

W 1986 roku ewakuowano około 116 000 osób z terenów otaczających elektrownię. Na podstawie pomiarów i obliczeń ustalono, że około 30 000 poszkodowanych ewakuowanych z miasta Pripjat (Ukraina) i okolicznych wsi otrzymało dawki promieniowania zewnętrznego od 0,1 do 383 mSv (średnia dawka to 17 mSv) [30]. Dawki napromieniowania tarczycy były największe u dzieci poniżej 1. roku życia i między 1. a 3. rokiem życia ewakuowanych z Pripjat i wynosiły odpowiednio 2,18 Gy i 1,28 Gy [31]. Średnia dawka promieniowania na tarczycę dorosłych pochodzących z Czarnobylu wyniosła 0,16 Gy [32].

Raport UNSCEAR 2000 definiuje tereny skażone promieniotwórczo jako obszary, na których pomiary aktywności  $^{137}\text{Cs}$  w ziemi wykazały natężenie powyżej 37 kBq/m<sup>2</sup> (1 Ci/km<sup>2</sup>) [1]. Na terenie byłego ZSRR wyodrębniono 3 takie obszary: centralny (w promieniu 100 km od elektrowni), Gomel-Mogilev-Bryansk i Kaluga-Tula-Orel [1]. Łącznie zajmują one 146 110 km<sup>2</sup> (46 500 km<sup>2</sup> na Białorusi, 41 900 km<sup>2</sup> na Ukrainie i 57 650 km<sup>2</sup> w Rosji) [33, 34], a obszar ten zamieszkuje około 6 milionów ludzi (19% populacji Białorusi, 5% populacji Ukrainy i około 1% populacji Rosji) [4]. Do innych krajów, w których zanotowano zblizoną aktywność  $^{137}\text{Cs}$ , należą: Szwecja (skażone 12 000 km<sup>2</sup>), Finlandia (skażone 11 500 km<sup>2</sup>), Austria (skażone 8 600 km<sup>2</sup>), Norwegia i Bułgaria [35].

Obszary, na których stężenie  $^{137}\text{Cs}$  przekracza 555 kBq/m<sup>2</sup> (15 Ci/km<sup>2</sup>), nazywane są strefami ścisłej kontroli (*strictly controlled zones*). Zamieszkuje je 270 000 osób [36].

Średnią dawkę promieniowania, na którą narażona jest ta populacja w ciągu 70 lat *International Atomic Energy Agency* (IAEA) oszacował na 80–160 mSv [37]. Natomiast według obliczeń zawartych w raporcie UNSCEAR 2000 ludność zamieszkująca skażone tereny w ciągu pierwszego roku od wypadku otrzymała dawki promieniowania w wysokości 15–24  $\mu\text{Sv}$  na kBq/m<sup>2</sup> aktywności  $^{137}\text{Cs}$  na terenach wiejskich; od 11 do 17  $\mu\text{Sv}$  na kBq/m<sup>2</sup> aktywności  $^{137}\text{Cs}$  na terenach miejskich, a dawka otrzymana przez całe życie wynosi od 42 do 88  $\mu\text{Sv}$  na kBq/m<sup>2</sup> aktywności  $^{137}\text{Cs}$  [1]. Średnia indywidualna dawka promieniowania na tarczycę dla populacji Kijowa wyniosła w zależności od roku urodzenia od 104 mGy (rok urodzenia 1983–1986), 62 mGy (rok urodzenia 1979–1982), 41 mGy (rok urodzenia poniżej 1971), 19 mGy (rok urodzenia 1975–1978) do 18 mGy (rok urodzenia 1971–1974) [38]. Likhtarev i wsp. [39] na podstawie pomiarów aktywności tarczycy w trzech okręgach regionu Czerniow (Ukraina) wykazali, że największe dawki napromieniowania tarczycy występowały na zachodzie regionu, skąd było najbliżej do elektrowni jądrowej w Czarnobylu — 3,3 Gy dla dzieci i 0,5 Gy dla dorosłych.

W Rosji dawki promieniowania na tarczycę wahały się od 9 mGy na terenach miejskich do 54 mGy na terenach wiejskich (śr. dawka to 10 mGy) [40, 41].

Pomiary wykonane na Białorusi w regionie Gomel i Mogilev wykazały, że średnie dawki napromieniowania tarczycy w całej populacji i u dzieci w wieku od 0 do 7 lat są dwa razy większe na terenach wiejskich (Gomel: 0–7 lat dawka promieniowania na tarczycę — 1,1 Gy, cała populacja — 0,4 Gy; Mogilev: 0–7 lat — 0,4 Gy, cała populacja — 0,2 Gy) niż na terenach miejskich (Gomel: 0–7 lat dawka promieniowania na tarczycę — 0,4 Gy, cała populacja — 0,2 Gy; Mogilev: 0–7 lat — 0,2 Gy, cała populacja — 0,08 Gy) [42]. Badania sekcyjne dzieci i dorosłych, zmarłych z różnych przyczyn w 1997 roku, pochodzących z obszarów wiejskich regionu Gomel wykazały od 2 do 3 razy wyższą aktywność  $^{137}\text{Cs}$  w organach dzieci w porównaniu z organami dorosłych. Najwyższa aktywność  $^{137}\text{Cs}$  występowała w tarczycy, nadnerczach i trzustce [43].

## Dawki promieniowania na obszarze Polski i innych państw

Oprócz ludności Białorusi, Rosji i Ukrainy działaniu promieniowania jonizującego zostali poddani także mieszkańcy innych krajów. Zgodnie z raportem UNSCEAR 1988 średnia roczna dawka promieniowania na całe ciało w pierwszym roku po awarii była największa w Bułgarii — 760  $\mu\text{Sv}$ , Austrii — 670  $\mu\text{Sv}$  i Grecji — 590  $\mu\text{Sv}$ . Dla porównania w Portugalii wynosiła ona 1,8  $\mu\text{Sv}$ , Hiszpanii 4,2  $\mu\text{Sv}$ , a w Wielkiej Brytanii 27  $\mu\text{Sv}$  [6].

Podobnie jest z dawkami promieniowania na tarczycę w 1. roku po wypadku u dzieci i dorosłych. Największe zanotowano w Bułgarii i Grecji, odpowiednio  $25\,000\ \mu\text{Sv}$ ,  $2900\ \mu\text{Sv}$  i  $20\,000\ \mu\text{Sv}$ ,  $5000\ \mu\text{Sv}$ , a najmniejsze w Portugalii —  $9\ \mu\text{Sv}$  u dzieci i  $4\ \mu\text{Sv}$  u dorosłych. W Stanach Zjednoczonych dawka roczna w 1. roku po awarii wynosiła  $1,5\ \mu\text{Sv}$  na całe ciało,  $110\ \mu\text{Sv}$  na tarczycę dzieci i  $15\ \mu\text{Sv}$  na tarczycę dorosłych [6]. Oszacowane średnie dawki napromieniowania szpiku kostnego wahały się od  $0,7\ \text{mGy}$  na Węgrzech i w Turcji do  $4\ \text{mGy}$  w Szwecji i Bawarii (Niemcy) [1]. Basić i wsp. [44] po przebadaniu tarczyc 30 płodów pochodzących z okręgu Zagrzeb (Chorwacja) wykazali, że dawka promieniowania na tarczycę płodu w 20. tygodniu ciąży osiągnęła maksymalną wartość  $0,43\ \mu\text{Gy/Bq}$  wychwyty, a następnie zaczęła powoli spadać.

Wzrost radioaktywności w powietrzu stwierdzono w północno-wschodniej części Polski 27 kwietnia 1986 roku o godzinie 20.00 [45]. Przez następne 3 dni stężenie radiojodu w powietrzu wynosiło od  $0,1$  do  $200\ \text{Bq/m}^3$ . Między 1 a 3 maja wahało się w granicach  $2$ – $10\ \text{Bq/m}^3$ , a przez następne 7 dni (do 10 maja) — od  $0,2$  do  $2,8\ \text{Bq/m}^3$  [46]. Aktywność  $^{131}\text{I}$  w glebach wynosiła od  $63,2$  do  $729\ \text{kBq/m}^2$ , a większy osad  $^{131}\text{I}$  występował na terenach z opadami deszczu [47]. Na północno-wschodnich obszarach naszego kraju stężenie  $^{131}\text{I}$  w mleku osiągnęło wartość  $3\ \text{kBq/l}$  [48]. Zawartość  $^{137}\text{Cs}$  w środowisku szacowano na  $5,2\ \text{kBq/m}^2$  [6]. Badając aktywność różnych izotopów plutonu w glebie, stwierdzono największą ilość „czarnobylskiego plutonu” w północno-wschodniej Polsce, czyli na obszarze, na który spadła znacząca część nietlonych składników radioaktywnej chmury [49]. W Polsce efektywny równoważnik dawki w 1. roku po awarii szacuje się na  $120$ – $706\ \mu\text{Sv}$  (śr.  $307\ \mu\text{Sv}$ ) według piśmiennictwa polskiego [48] lub na  $270\ \mu\text{Sv}$  według raportu UNSCEAR 1988 [6]. Efektywny równoważnik dawki obciążającej dla ludności Polski w wyniku awarii w Czarnobylu zawiera się w przedziale  $370$ – $2140\ \mu\text{Sv}$ , średnio  $932\ \mu\text{Sv}$  ( $363\ \mu\text{Sv}$  od promieniowania zewnętrznego,  $524\ \mu\text{Sv}$  drogą pokarmową i  $45\ \mu\text{Sv}$  wziewnie) [48]. Jest on zbliżony do dawki granicznej opublikowanej w *Monitorze Polskim* nr 14, poz. 124 z 1988 roku, która dla ludności narażonej na wpływ promieniowania jonizującego z powodu stosowania wyrobów powszechnego użytku emitujących takie promieniowanie (w tym kobiet w ciąży), wynosi  $1\ \text{mSv/rok}$ .

Według opracowania Krajewskiego [15] przewidywane dawki napromieniowania tarczycy w Polsce zawarte są między  $2$ – $87,5\ \text{mSv}$  dla dzieci do 1. roku życia,  $2,5$ – $52\ \text{mSv}$  dla dzieci do 5. roku życia,  $2,4$ – $41,5\ \text{mSv}$  dla

dzieci lat 10. roku życia i  $1,6$ – $23\ \text{mSv}$  dla dorosłych. Dawka napromieniowania tarczycy polskich dzieci, młodzieży i dorosłych była ogólnie mała i bardzo zróżnicowana [14]. Na duże dawki napromieniowania tarczycy narażeni byli mieszkańcy byłego województwa białkopodlaskiego (dzieci do 1. rż. —  $87,5\ \text{mSv}$ , między 1.–5. rż. —  $52\ \text{mSv}$ , 5.–10. rż. —  $41,5\ \text{mSv}$ , dorośli —  $23\ \text{mSv}$ ), nowosądeckiego i łomżyńskiego. Najmniejsze dawki napromieniowania dotarły do mieszkańców byłego województwa śląskiego (dzieci do 1. rż. —  $15,2\ \text{mSv}$ , między 1.–5. rż. —  $9\ \text{mSv}$ , 5.–10. rż. —  $7,2\ \text{mSv}$ , dorośli —  $4\ \text{mSv}$ ), rzeszowskiego i koszańskiego [15].

Pietrzak-Flis i wsp. [47], wykorzystując komputerowy model CLRP, retrospektywnie ocenili średnie dawki promieniowania na tarczycę w Polsce. Inhalacyjne dawki na tarczycę zawierały się w granicach:  $1,0$ – $11,1\ \text{mSv}$  dla dorosłych,  $1,5$ – $17,6\ \text{mSv}$  dla 5-letnich i  $1,4$ – $16,5\ \text{mSv}$  dla 10-letnich dzieci. Zastosowanie profilaktyki jodowej 29 kwietnia 1986 roku zmniejszyło te dawki o 61% u dorosłych i o 62% u dzieci, a podanie stabilnego jodu 30 kwietnia 1986 roku spowodowało zmniejszenie dawek o 28% we wszystkich grupach wiekowych. Dawki promieniowania na tarczycę w wyniku skażeń pokarmowych i inhalacyjnych dla 5-letnich, 10-letnich dzieci i dorosłych zawierały się w przedziale odpowiednio:  $15,4$ – $178\ \text{mSv}$ ,  $10,4$ – $120\ \text{mSv}$  i  $3,7$ – $45,2\ \text{mSv}$ . Zastosowanie profilaktyki, takiej jak na przykład doustne podanie roztworu jodu, zmniejszyły te dawki o około 30%.

Analizując cytowane powyżej dane, należy brać pod uwagę potencjalny wpływ radionuklidów wydzielenych w trakcie katastrofy w Czarnobylu na stan zdrowia ludności, prowadzić dalsze badania obserwacyjne i planować działania profilaktyczne związane z podobnymi katastrofami.

## Piśmiennictwo

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 2000: Report to the General Assembly with annexes. United Nations, New York 2000.
2. Adelstein SJ. Uncertainty and Relative Risks of Radiation Exposure. *JAMA* 1987; 258: 655–657.
3. Rich V. Soviet inquiry. Chernobyl accident is blamed on human terror. *Nature* 1986; 322: 295.
4. A Report Comissioned by UNDP and UNICEF with the support of UN-OCHA and WHO. The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident. A Strategy for Recovery. 25 January 2002.
5. Dreicer M, Aarkrog A, Alexakhin R i wsp. Consequences of the Chernobyl accident for the natura and human environments. W: One decade after Chernobyl: summing up the consequences of the accident. Proceedings of an International Conference, Vienna, April 8–12, 1996. International Atomic Energy Agency, Vienna 1996: 319–361.

6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 1988: Report to the General Assembly with annexes. United Nations Sales Publication E.88.IX.7. United Nations, New York 1988.
7. United Nations. Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1982 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations publication E.82.IX.S. New York 1982
8. Department of Energy, United States. Health and environmental consequences of the Chernobyl nuclear power plant accident. 1987; DOE/ER-0332.
9. Halperin JA, Schleiën B, Kahana SE i wsp. Background material for the development of FDA's recommendation on thyroid-blocking with KI. HHS Publication, FDA 1981; 81-8158.
10. Davis S, Kopecky KJ, Hamilton TE i wsp. Hanford Thyroid Disease Study Final Report. Fred Hutchinson Cancer Research Center. 2002; June 21.
11. Jaworowski Z. Komentarz do artykułu: Moysich KB, Menezes RJ, Michalek AM. Czarnobyl — ekspozycja na promieniowanie jonizujące a ryzyko choroby nowotworowej: analiza epidemiologiczna. *Lancet Oncol-PL* 2002; 1: 95–106.
12. Majle T. Ochrona przed promieniowaniem jonizującym. W: Pruszyński B, (red.). *Radiologia. Diagnostyka obrazowa, RTG, TK, USG i radioizotopy*. PZWL, Warszawa 2002: 75–81.
13. International Atomic Energy Agency. Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident. Safety Series No. 75-INSAG-1. IAEA, Vienna, 1986.
14. Nauman J. Wyniki badań programu MZ-XVII prowadzonych w skali kraju; podsumowanie i wnioski. *Endokrynol Pol* 1991; 42: 359–367.
15. Krajewski P. Ocena równoważników dawek obciążających w tarczycy dla ludności Polski w wyniku wchłonięć <sup>131</sup>I po awarii w Czarnobylu. Określenie efektu blokady tarczycy jodkiem potasu. *Endokrynol Pol* 2002; 53: 13–36.
16. Checherov KP, Kumshaev SB, Tokarchuk MV. Scale of radionuclide emission AT the Chornobyl Nuclear Power Plant in 1986 (The analysis of estimations). *Condensed Matter Physics* 2000; 23: 597–606.
17. Franic Z, Lokobauer N, Marovic G. Radiostrontium activity concentrations in milk in the republic of Croatia for 1961–2001 and dose assessment. *Health Phys* 2004; 87: 160–165.
18. Devell L, Guntay S, Powers DA. The Chernobyl reactor accident source term. Development of a consensus view. 1996; NEA/CSNI/R(95)24.
19. Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Cooperation and Development. Chernobyl: Ten years on radiological and health impact. OECD, Paris 1995.
20. Kruger FW, Albrecht L, Spoden E i wsp. Der Ablauf des Reaktorunfalls Tchernobyl 4 und die weitraumige Verfrachtung des freigesetzten Materials: Neuere Erkenntnisse und die Bewertung: 7–22 in Zehn Jahre nach Tchernobyl, eine Bilanz. Gustav Fischer, 1996.
21. Abagjan AA, Asmolov VG, Guskova AK i wsp. Accident at the Chernobyl atomic power station and its consequences. W: The information prepared for meeting of experts MARGATE (August, 25-29, 1986, Vienna), cz. 1, Generalized material, Moscow, GK IAE the USSR, 1986.
22. Bonte FE. Chernobyl Retrospective. *Semin Nucl Med* 1988; 18: 16.
23. Ilyin LA. Realities and Myths of Chernobyl. ALARA Limited, Moscow 1994.
24. Kutkov VA, Gusev IA, Dementiev SI. Doses of internal irradiation of the persons involved in April–May 1986 in the liquidation of the consequences of the accident on the Chernobyl nuclear power plant. *Med Radiol* 1996; 3.
25. Ginzburg HM, Reis E. Consequences of the nuclear power plant accident AT Chernobyl. *Public Health Rep* 1991; 106: 32–40.
26. Ivanov VK, Tryb AF, Ivanov SI. Liquidators of the Chernobyl Catastrophe: Radiation Epidemiological Analysis of Medical Consequences. Galanis, Moscow 1999.
27. Sevan'kaev AV, Lloyd DC, Braselmann H i wsp. A survey of chromosomal aberrations in lymphocytes of Chernobyl liquidators. *Radiat Prot Dosim* 1995; 58: 85–91.
28. Tsyb AF, Ivanov VK, Airanetov SA i wsp. System of radiation-epidemiological analysis of data of Russian national medico-dosimetric register of participants in the liquidation of consequences of the Chernobyl accident. *Bull Radiat Risk* 1992; 2: 69–109.
29. Jensen RH, Langlois RG, Bigbee WL i wsp. Elevated frequency of glucophorin A mutations in erythrocytes from Chernobyl accident victims. *Radiat Res* 1995; 141: 129–135.
30. Likhtarev IA, Chumak VV, Repin VS. Retrospective reconstruction of individual and collective external gamma doses of population evacuated after the Chernobyl accident. *Health Phys* 1994; 66: 643–652.
31. Goulko GM, Chumak VV, Chepurny NI i wsp. Estimation of <sup>131</sup>I doses for the evacuees from Pripjat. *Radiat Environ Biophys* 1996; 35: 81–87.
32. Repin VS. Dose Reconstruction and Assessment of the Role of Some Factors in Radiation Exposure to Inhabitants, Evacuated Outside the 30-km Zone After the Chernobyl Accident. Problems of Chernobyl Exclusion Zone. Naukova Dumka Publishing House, Kiev 1996.
33. Izrael Y, Kvasnikova E, Nazarov I i wsp. Global and regional pollution of the former European USSR with caesium-137. *Meteorol Gidrol* 1994; 5: 5–9.
34. Germenchuk M. Communication to the UNSCEAR Secretariat. Belgidromet, Minsk 1998.
35. Izrael Y, De Cort M, Jones AR i wsp. The atlas of caesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident: 1–10. W: Karaoglou A., Desmet G., Kelly G.N. i wsp. (red.). The radiological consequences of the chernobyl accident. Proceedings of the First International Conference, Minsk, Belarus, March 1996. EUR 16544.
36. Bard D, Verger P, Hubert P. Chernobyl, 10 Years After: Health Consequences. *Epidemiologic Rev* 1997; 19: 187–204.
37. The International Chernobyl Project: an overview. Assessment of radiological consequences and evaluation of protective measures: report by an international advisory committee. International Atomic Energy Agency, Vienna 1991.
38. Likhtarev IA, Goulko GM, Kairo IA i wsp. Thyroid doses resulting from the Ukraine Chernobyl accident — Cz. I: Dose estimates for the population of Kiev *Health Phys* 1994; 66: 137–146.
39. Likhtarev IA, Goulko GM, Sobolev BG i wsp. Thyroid dose assessment for the Chernigov region (Ukraine): estimation based on <sup>131</sup>I thyroid measurements and extrapolation of the results to districts without monitoring. *Radiat Environ Biophys* 1994; 33: 149–166.
40. Ramzaev PV, Balonov MI, Kacevich AI i wsp. Radiation doses and health consequences of the Chernobyl accident in Russia. W: Assessment of the Health and Environmental Impact from Radiation Doses due to Released Radionuclides. NIRS-M-102, 1994; 3–25
41. Zvonova IA, Balonov MI. Radioiodine dosimetry and prediction of consequences of thyroid exposure of the Russian population following the Chernobyl accident. W: Merwin SE, Balonov MI (red.). The chernobyl papers. Doses to the Soviet population and early health effects studies. Volume I. Research Enterprises Inc., Richland 1993; 71–125.
42. Ilyin LA. Public dose burdens and health effects due to the Chernobyl accident. Paper Presented at the International Meeting Organized Jointly by Soviet and French Nuclear Societies with the Participation of the European Nuclear Society, April 1991; Paris.
43. Bandazhevsky YI. Chronic Cs-137 incorporation in children's organs. *Swiss Med Wkly* 2003; 133: 488–490.

44. Bašić M, Kasal B, Simonović I i wsp.  $^{131}\text{I}$  dose to the human fetal thyroid in the Zagreb district, Yugoslavia, from the Chernobyl accident. *Int J Radiat Biol* 1988; 54: 167–177.
45. Majle T. Implikacje zdrowotne na terytorium Polski awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu. *Terapia i Leki* 1991; 19: 173–180.
46. WHO European Office. Radiological Situation in Poland. (Nauman J, Suchowiak J) Copenhagen 12/13 May 1986.
47. Pietrzak-Flis Z, Krajewski P, Radwan I i wsp. Retrospective evaluation of  $^{131}\text{I}$  deposition density and thyroid dose in Poland after the Chernobyl accident. *Health Phys* 2003; 84: 698–708.
48. Żarnowiecki K. Analiza skażeń promieniotwórczych i zagrożenia radiologicznego w Polsce po awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu. Raport Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej Nr 120/D, Warszawa 1988.
49. Ketterer ME, Hafer KM, Mieltski JW. Resolving Chernobyl vs. global fallout contributions in soils from Poland using Plutonium atom ratios measured by inductively coupled plasma mass spectrometry. *J Environ Radioact* 2004; 73: 183–201.