



## Posledice nuklearne nesreće u Černobilju na teritoriji Republike Srbije

### Consequences of the Chernobyl disaster in the region of the Republic of Serbia

Dragana Popović\*, Vesna Spasić-Jokić†

\*Fakultet veterinarske medicine, Katedra za fiziku, Beograd;

†Institut za nuklearne nauke Vinča, Laboratorija za fiziku, Beograd

#### Ključne reči:

černobilj, nuklearni akcident; jugoslavija; radioizotopi; životna sredina; radioaktivni zagađivači.

#### Key words:

chernobyl nuclear accident; yugoslavia; radioisotopes; environment; radioactive pollutants.

#### Uvod

##### *Nuklearna elektrana u Černobilju*

Nuklearna elektrana Černobilj nalazila se na reci Pripjat, 18 km severozapadno od grada Černobilja, 10 km od granice sa Belorusijom i 10 km severno od Kijeva (tri miliona stanovnika). Čimila su je četiri reaktora tipa RBMK – 1000 (1 GW električne, odnosno 3,2 GW termičke snage). Reaktor je hlađen lakom vodom, grafit je korišćen kao moderator, a prirodni uranijum kao gorivo. Mana ovog tipa reaktora, koji još uvek rade u nekim zemaljama bivše Istočne Evrope, pre svega je u nedostatku zaštitne strukture i velikoj količini zapaljivog grafita u jezgru. Elektrana je definitivno zatvorena decembra 2000. godine.

##### *Scenario akcidenta i kretanje radioaktivnog oblaka*

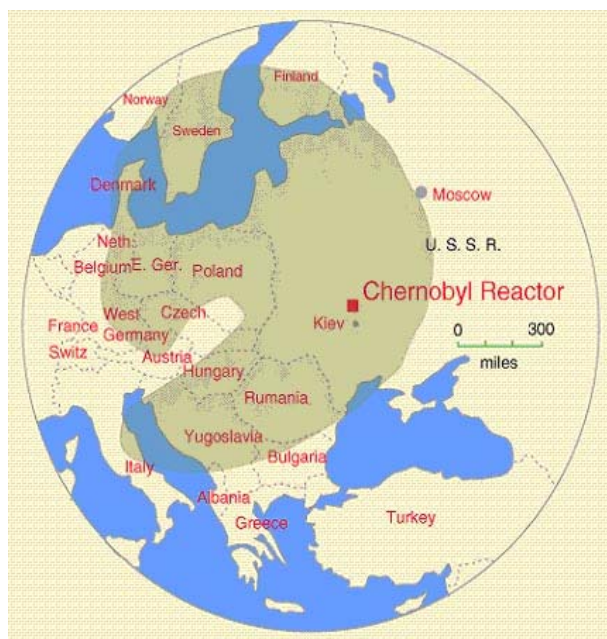
Akcident se dogodio na bloku četiri 26. aprila 1986. godine u 1 h 23 min 58 sec po lokalnom vremenu. O uzroku akcidenta postoje dve teorije: prva – kao uzrok se navodi ljudski faktor i druga – apostrofira se loša konstrukcija RBMK reaktora, posebno nepouzdanost upravljanja kontrolnim šipkama. Neposredni uzrok akcidenta bilo je isključivanje reaktora u cilju testiranja mogućnosti napajanja pumpe za vodu pomoću turbogeneratora. Slični testovi su izvođeni i ranije, uprkos činjenici da je ovaj tip reaktora veoma nestabilan na niskim snagama. Testiranje je imalo niz opasnih koraka, od kojih je najkritičniji bio smanjenje snage znatno ispod dozvoljenih 22% pune snage. Takođe, operator je propustio da reprogramira kompjuter na nižu snagu, a sve kontrolne šipke bile su izvučene iz jezgra do tačke kada više nisu mogle da brzo ugase reaktor. U cilju testiranja isključeni su ili premošćeni sistemi za vanredno hlađenje jezgra i nekoliko

automatskih sigurnosnih uređaja. Smanjenje protoka u sistemu za hlađenje izazvalo je povećanje reaktivnosti i rast izlazne snage. Pokušano je ručno gašenje, ali bez uspeha. Jezgro je ušlo u kritično stanje pregrevanja, gorivi elementi su se polomili. Pritisak pare je razneo zaštitu od čelika i cementa, tešku 1 000 t, oslobađajući fisione produkte u atmosferu. Snaga eksplozije bila je ravna eksploziji jedne tone trinitrotoluola (TNT). Druga eksplozija je izbacila fragmente zapaljenog goriva i grafita iz jezgra. Ukupno je oslobođeno oko  $10 \times 10^{18}$  Bq<sup>1-4</sup>.

Deo oslobođenog materijala se nataložio kao prah i krhotine, dok su lakši materijali odneti vetrom preko Ukrajine, Belorusije i Rusije u Evropu i južni deo SAD. Vetar je tokom akcidenta menjao pravac: krajem maja i do sredine aprila dominirali su severni i severozapadni vetrovi, koji krajem aprila skreću na jug i jugoistok, donoseći česte pljuskove. Prvi oblak je doveo do kontaminacije Skandinavije, drugi je uslovio kontaminaciju Poljske, Čehoslovačke, Austrije, južne Nemačke i Italije, a treći je pogodio Balkanske zemlje. Na slici 1 prikazano je kretanje radioaktivnog oblaka na dan 12. maja 1986. godine<sup>1-4</sup>.

#### Neposredne posledice akcidenta u Černobilju

U vreme akcidenta u reaktoru je bilo oko 200 t uranijuma. Prema zvaničnim izjavama u reaktoru je ostalo 95% goriva (ukupne aktivnosti 670 PBq), dok je procenjeno da je u atmosferu otišao sav gasoviti ksenon, polovina joda i cezijuma i najmanje 5% ostale aktivnosti, ukupno više od 40 radionuklida, aktivnosti reda veličine  $10^{18}$  Bq. S obzirom na poluvreme raspada za analizu posledica akcidenta najznačajniji su radioaktivni jod <sup>131</sup>I (osam dana), cezijum <sup>137</sup>Cs (30



Sl. 1 – Kretanje radioaktivnog oblaka na dan 12. maja 1986. godine

godina), stroncijum  $^{90}\text{Sr}$  (29 godina) i u manjoj meri plutonijum  $^{241}\text{Pu}$  (2 400 godina). Najznačajniji radionuklidi ispušteni u atmosferu iz reaktora u Černobilju 26. aprila 1986. godine dati su tabeli 1<sup>1-4</sup>.

Tabela 1

Ukupna aktivnost radionuklida (PBq) ispuštenih 26.04.1986<sup>1</sup>

Radionuklid	1986 [PBq <sup>*</sup> ]	1996 [PBq]	2056 [PBq]
$^{131}\text{I}$	1200–1700	0	0
$^{90}\text{Sr}$	8	6	1,5
$^{134}\text{Cs}$	44,48	1,6	0
$^{137}\text{Cs}$	74,85	68	17
$^{238}\text{Pu}$	0,03	0,03	0,02
$^{239}\text{Pu}$	0,03	0,03	0,03
$^{240}\text{Pu}$	0,044	0,044	0,03
$^{241}\text{Pu}$	5,9	3,6	0,2
$^{241}\text{Am}^\dagger$	0,005	0,08	0,2

\* 1 PBq =  $10^{15}$  Bq; <sup>†</sup> aktivnost  $^{241}\text{Am}$  raste pošto je produkt raspada  $^{241}\text{Pu}$  (14 god.)

Procena je da je oko 150 000 km<sup>2</sup> na teritoriji Belorusije, Ukrajine i Rusije kontaminirano  $^{137}\text{Cs}$  aktivnosti iznad  $10^{10}$  Bq. Kontaminirana teritorija je podeljena u četiri zone: I zona (do  $18,5 \times 10^{10}$  Bq) sa merama periodičnog monitoringa i privilegovanim socioekonomskim statusom; II zona (do  $55,5 \times 10^{10}$  Bq) u koju je dozvoljen povratak evakuisanog stanovništva; III zona (do  $148 \times 10^{10}$  Bq) je tzv. zona dobrovoljnog povratka i IV zona (iznad  $148 \times 10^{10}$  Bq) sa zabranom povratka 30 godina od akcidenta<sup>1-4</sup>.

Po obimu zagađenja i posledicama akcident u Černobilju se poredi sa hemijskom katastrofom u Bopalu, Indija, 1984. godine. Na posledice černobiljskog akcidenta na životnu sredinu nije uticala samo prostorna raspodela radionuklida već i činjenica da cezijum, stroncijum i plutonijum ulaze u lanac ishrane, a mogu se transportovati i vetrom, erozijom, požarima, kultivacijom tla i tekućim vodama.

## Metode merenja i metrološko obezbeđenje

Za evaluaciju izloženosti stanovništva zračenju i kontaminacije okoline kao posledice černobiljskog akcidenta korišćene su brojne metode merenja. Teško je, međutim, proceniti validnost rezultata merenja iz tri osnovna razloga<sup>5</sup>: različite organizacije su koristile različite dozimetre bez interkalibracije, veliki broj izmerenih vrednosti je bio blizu granice detekcije i najveći broj vrednosti u izveštajima je zaokružen, npr. 0,1 Sv, 0,2 Sv i sl.

U proceni kontaminacije ljudi, životinja i životne sredine korišćene su metode internog i eksternog monitoringa koje su u datom trenutku bile na raspolaganju institucijama u bivšoj Jugoslaviji: u merenjima su učestvovali Institut za nuklearne nauke Vinča, Veterinarski fakultet (VF), Institut bezbednosti, Vojnomedicinska akademija, Vojnotehnički institut i Institut „Dr Dragomir Karajović“ iz Beograda, Prirodno-matematički fakultet iz Novog Sada, Institut za medicinska istraživanja i Institut „Ruđer Bošković“ iz Zagreba i „Zavod za varstvo pri delu“ i Institut „Jožef Štefan“ iz Ljubljane<sup>6-10</sup>. Najveći broj institucija je koristio scintilacione NaI(Tl) ili poluprovodničke brojače (HPGe i GeLi) u energetskom opsegu 100 keV do 10 MeV, efikasnosti do 25%, rezolucije (1,8–2,65) keV (proširena merna nesigurnost 10%, k = 2 uz pažljivu kalibraciju)<sup>9</sup>.

### Metrološko obezbeđenje rezultata merenja aktivnosti u periodu od 1986. do 2003. godine

Sa metrološkog aspekta akcident u Černobilju je pokazao nedovoljnu opremljenost institucija u zemlji za akcidente ovakvih razmera. Nije postojala adekvatna oprema, a ni neophodni metrološki propisi za merila i metode etaloniranja (kalibracije), kao ni referentni materijali. Neposredno posle akcidenta organizovana su brojna međulaboratorijska merenja i interkomparacije, posebno u domenu spektrometrije gama zračenja<sup>5,6</sup>.

Od 1986. do 2003. godine na osnovu Zakona o mernim jedinicama i merilima doneta je obimna relevantna metrološka regulativa, usklađena sa preporukama Međunarodne organizacije za zakonsku metrologiju (OIML) i Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA). Doneti su propisi koji

regulišu klasifikaciju, upotrebu i metode prenosa jedinice aktivnosti radionuklida emitera alfa, beta i gama zračenja i jedinice kerme u vazduhu, kao i niz propisa koji definišu metrološke karakteristike i načine etaloniranja Geiger-Müllerovog (GM) brojača, poluprovodničkih i scintilacionih gamaspektrometara i brojača, termoluminescentnih dozimetara, poluprovodničkih i scintilacionih spektrometara alfa zračenja, proporcionalnih brojača, merila površinske kontaminacije, dozimetara u zaštiti od zračenja i jonizacionih komora različite konstrukcije i namene. Od 2000. do 2003. godine aktivno je radila Radna grupa za metrologiju aktivnosti radionuklida u okviru Komisije za metrologiju jonizujućih zračenja Saveznog zavoda za mere i dragocene metale, koja se posebno bavila formiranjem baze podataka o tehničkim karakteristikama merila i uslovima merenja aktivnosti radionuklida. Na osnovu toga sastavljen je 1997. godine Uputnik prema EML *Procedures Manual „Quality Control and Quality Assurance in Radioactivity Measurements“* HASL-300, 1990/92, prilagođen našim uslovima. Na osnovu analize podataka iz upitnika zaključeno je i da je, radi ostvarivanja boljeg kvaliteta merenja i pouzdanosti rezultata u skladu sa međunarodnim standardima i našim zakonodavstvom, potrebno uvesti redovne preglede merila jonizujućeg zračenja, organizovati redovne interkalibracije merila i interkomparacije metoda za merenje aktivnosti na nacionalnom nivou, kao i uključiti se u ove postupke na međunarodnom nivou<sup>11,12</sup>.

Tokom 1991. i 1992. godine sprovedena je interkalibracija poluprovodničkih HPGe detektora u organizaciji Zavoda, kao prvi korak ka sveobuhvatnijoj akciji ustanovljavanja metrološkog jedinstva u oblasti metrologije aktivnosti radioaktivnih izvora emitera gama zračenja u uzorcima iz životne sredine. U interkalibraciji je učestvovalo 15 laboratorija iz bivše Jugoslavije, a korišćeni su uzorci referentnih materijala: mleko u prahu, zemlja i vodeni rastvor, kontaminirani <sup>22</sup>Na, <sup>57</sup>Co, <sup>60</sup>Co, <sup>88</sup>Y, <sup>133</sup>Ba i <sup>137</sup>Cs, nabavljeni od Nacionalnog biroa za mere (OMH) iz Mađarske<sup>13,14</sup>. Od 2000. do 2003. godine sprovedena je interkalibracija poluprovodničkih gama spektrometara pomoću referentnih uzoraka nabavljenih od Međunarodne agencije za atomsku energiju iz Beča (mleko u prahu, životinjske kosti, riblje meso i sediment).

### Merenje uzoraka iz okoline u vreme i neposredno posle černobiljskog akcidenta

Neposredno posle nesreće u Srbiji su počela sistematska merenja uzoraka iz životne sredine. U Laboratoriji za radijacionu higijenu Fakulteta veterinarske medicine u Beogradu kontinuirano je merena jačina ekspozicione doze gama zračenja dozimetrom zračenja (MZ-10 IBK Vinča) ugrađenim u terensko vozilo, jačina apsorbovane doze u

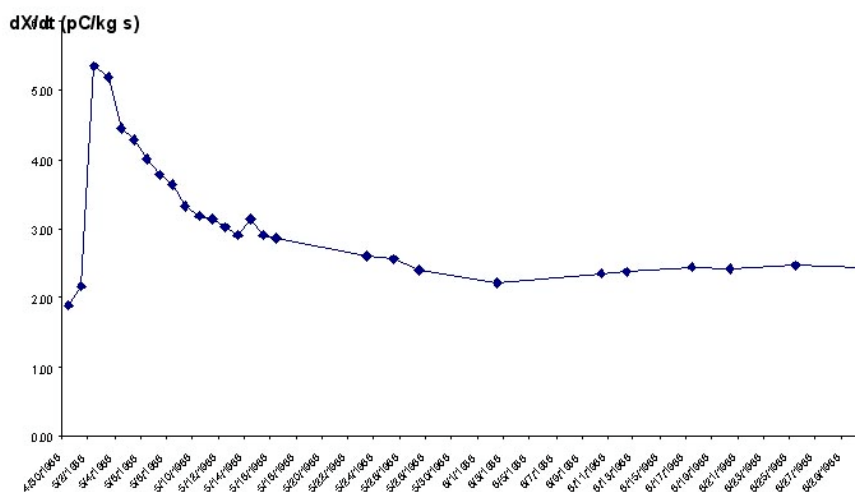
vazduhu termoluminescentnim dozimetrima na bazi MgB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>: Dy (IBK Vinča) i aktivnost radionuklida u kišnici, travi, namirnicama i stočnoj hrani. Aktivnost radionuklida određivana je trijažnom radiometrijskom metodom (radiometrijska laboratorije LARA-10 (IBK Vinča) i standardnom metodom spektrometrije gama zračenja na poluprovodničkom detektoru Ge(Li), Ortec, relativna efikasnost 23%)<sup>15,16</sup>.

Tokom maja 1986. godine izmereno je preko 1 300 uzoraka iz životne sredine i namirnica uzorkovanih na preko 60 lokacija na teritoriji Srbije. Izveden je ogled na 300 visoko mlečnih krava u cilju određivanja brzine izlučivanja radionuklida putem mleka i procenjem stepen ozračenosti radnika u jednoj fabrici stočne hrane sa lucerkom kao osnovnom sirovinom, na osnovu čega su za visoko rizična radna mesta preporučene higijenske i tehničke mere zaštite<sup>17</sup>.

Aktivnost radionuklida koji su se našli u životnoj sredini kao posledica akcidenta u Černobilju sistematski je merena tokom 1986, 1987. i 1988. godine, a aktivnost <sup>137</sup>Cs u životnoj sredini praćena je do sredine devedesetih godina. Posebno je ispitivana distribucija cezijuma u sistemu „tlo–biljke–med“ u planinskim područjima u Srbiji<sup>18</sup>. Merenja koncentracije <sup>137</sup>Cs u prizemnom sloju vazduha nastavljena su u saradnji sa Laboratorijom za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke Vinča i deo su projekta ispitivanja fizike atmosferskih procesa<sup>19</sup>.

### Merenja jačine ekspozicione doze gama zračenja u vazduhu na teritoriji Beograda

Srednja jačine ekspozicione doze na lokaciji VF u Beogradu do 1985. godine bila je 1,1 pC/kgs (jačina apsorbovane doze 1,1 mGy/god). Promene jačine ekspozicione doze to-



Sl. 2 – Jačina ekspozicione doze 1986. godine u Beogradu (lokacija Veterinarski fakultet)

kom akcidenta i do kraja godine, na ovoj lokaciji prikazane su na slici 2 (jačina apsorbovane doze se tokom akcidenta povećala 5 ×)<sup>15</sup>.

U regionu planine Tare srednja jačina ekspozicione doze merena 1983/84. godine bila je 1,2 pC/kgs sa varijacijama do 10% zavisno od lokacije, što je nešto iznad srednjih vred-

nosti za Srbiju: 0,9–1,1 pC/kgs (srednja apsorbirana doza 0,44–2,02 mGy). Na istim lokacijama tokom aprila i maja 1986. godine jačina doze bila je 2,6–3,7 pC/kgs na otvorenom i 1,4–1,6 pC/kgs u zatvorenom prostoru<sup>20</sup>.

Prema podacima Laboratorije za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine u Institutu za nuklearne nauke u Vinči, do 1986. koncentracija <sup>137</sup>Cs u prizemnom sloju vazduha bila je reda veličine 10<sup>-5</sup> Bq/m<sup>3</sup>. Posle naglog i prolaznog rasta tokom aprila 1986, koncentracija cezijuma u prizemnom sloju vazduha varirala je tokom 1986, 1987. i 1988. godine kao posledica efekta lokalne resuspenzije sa tla, da bi se posle 1989. godine uspostavilo stanje pre akcidenta sa sezonskim varijacijama kao posledicom migracije vazdušnih masa između troposfere i stratosfere<sup>21</sup>. U tabeli 2 prikazani su rezultati merenja koncentracije <sup>137</sup>Cs u prizemnom sloju vazduha na lokaciji Vinča i centralnoj i severnoj Evropi (EU), od 1986. do 1988. godine<sup>1,4</sup>.

Tabela 2

Koncentracija <sup>137</sup> Cs*(Bq/m <sup>3</sup> ) u prizemnom sloju vazduha <sup>1,4</sup>			
	1986.	1987.	1988.
Vinča	3,9 × 10 <sup>-1</sup>	2,4 × 10 <sup>-4</sup>	9,5 × 10 <sup>-5</sup>
EU	8,8 × 10 <sup>-1</sup>	5,5 × 10 <sup>-4</sup>	8,0 × 10 <sup>-5</sup>

\* <sup>137</sup>Cs – radioaktivni cezijum

Tabela 3

	Radionuklidi (Bq/kg; Bq/l) u namirnicama i hranivu iz Srbije 1986.				
	<sup>131</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>103</sup> Ru	<sup>106</sup> Ru
Mleko	24–2800	1–150	3–400	2–26	2–17
Meso	3–14	2–145	5–330	do 1	do 25
Povrće/voće	100–3000	5–150	11–300	3–200	25–200
Hranivo	100–9800	3–850	25–2400	10–1200	40–640

Ukupna srednja aktivnosti <sup>137</sup>Cs u prizemnom sloju vazduha tokom 1986. godine u regionu bivše Jugoslavije bila je 6,65 Bq/m<sup>3</sup>, a na području Evrope u opsegu 1,3–14 Bq/m<sup>3</sup> (minimalne vrednosti izmerene su u Danskoj, Francuskoj i Irskoj, a maksimalne u Austriji, Českoj i Rumuniji)<sup>1</sup>.

U Beogradu su (lokacija VF) 1. maja 1986. godine u klišnici detektovani radionuklidi emitovani tokom akcidenta, posebno: <sup>131</sup>I (2 350 Bq/l), <sup>134</sup>Cs (45 Bq/l), <sup>137</sup>Cs (42 Bq/l), <sup>103</sup>Ru (200 Bq/l) i <sup>106</sup>Ru (180 Bq/l)<sup>15</sup>. Međutim, pošto su na teritoriji grada padavine bile veoma neravnomerne (8 mm u širem centru, 64 mm na lokaciji Vinče) i lokalna distribucija radioaktivnosti bila je veoma neravnomerna, kao i regionalna (duž obale Jadranskog mora na primer, 1. maja nije bilo padavina).

U travi na teritoriji grada početkom maja izmerena je aktivnost <sup>131</sup>I do 9 600 Bq/kg, <sup>137</sup>Cs do 14 400 Bq/kg. U Srbiji je ukupna depozicija tzv. černobiljskog cezijuma procenjena na 5 kBq/m<sup>2</sup><sup>22, 23</sup>. Ispitivanja obale Dunava u regionu Vojvodine pokazala su da su se u uzorcima sedimenta 2002. godine još uvek mogli detektovati i srednježiveći radionuklidi, dok je aktivnost <sup>137</sup>Cs bila 28 Bq/kg<sup>24</sup>.

#### Radionuklidi u namirnicama na teritoriji Srbije

Pre 1986. godine aktivnost <sup>137</sup>Cs u namirnicama sa teritorije Srbije bila je ispod 1 Bq/kg<sup>20</sup>. Početkom maja 1986.

godine u mleku su izmerene povećane koncentracije <sup>137</sup>Cs: od 20 Bq/l u kravljem mleku, do 900 Bq/l, u kozijem mleku, a do 30 Bq/kg u sirevima, zavisno od vrste i mesta uzorkovanja. Osim <sup>137</sup>Cs, u sirevima su detektovani i <sup>134</sup>Cs (11–428 Bq/kg), <sup>131</sup>I (130–7 400 Bq/kg) i <sup>136</sup>Cs, <sup>140</sup>Ba(La), <sup>141,144</sup>Ce do 100 Bq/kg<sup>25</sup>.

Opseg koncentracija radionuklida (Bq/kg ili Bq/l) izmeren maja 1986. godine u namirnicama i hrani sa teritorije Srbije prikazani su u tabeli 3<sup>15, 26, 27</sup>.

Od maja do septembra 1986. godine maksimalne koncentracije radionuklida na teritoriji Srbije izmerene su u ovčijem mleku (<sup>131</sup>I – 16 kBq/l, <sup>137</sup>Cs – 3 100 Bq/l), ovčijem siro (131I – 8 500 Bq/kg, <sup>137</sup>Cs – 560 Bq/kg), zelenoj salati (<sup>131</sup>I – 12 000 Bq/kg, <sup>137</sup>Cs – 5 kBq/kg) i jagnječem mesu (<sup>131</sup>I – 4 400 Bq/kg <sup>137</sup>Cs – 3300 Bq/kg)<sup>15, 27</sup>. Postojala je korelacija između površinske kontaminacije i kontaminacije hrane i hraniva, ali je zbog neuniformne raspodele odnos minimalnih i maksimalnih aktivnosti u uzorcima iste vrste iz regiona bio iznad 500, a odnosi masenih aktivnosti sa bliskih lokaliteta su se razlikovali i za faktor 1 000. Zbog vremena kada se akcident dogodio najugroženija je bila ovčarska proizvodnja, pa je ukupna aktivnost u ovčijem mesu, mleku i sirevima bila i za dva reda veličine veća nego u istim kravljim proizvodima<sup>17</sup>.

Na osnovu rezultata oglada sa kravama hranjenim visoko kontaminiranim hranivom (sveža zelena masa, aktivnost <sup>131</sup>I – 5 kBq/kg, <sup>137</sup>Cs – 1,3 kBq/kg) utvrđeno je da je maksimalno izlučivanje <sup>131</sup>I i <sup>137</sup>Cs u mleku dostignuto pet dana po početku unošenja kontaminiranog hraniva (5–7%). Saturacija izlučivanja <sup>137</sup>Cs postignuta je za 5–7 dana (1–2%), a procenat izlučivanja <sup>131</sup>I počeo je kontinuirano da opada pet dana od početka oglada<sup>28</sup>.

Doprinos kratkoživećih radionuklida u ukupnoj aktivnosti u namirnicama (mleko, mlečni proizvodi, meso, voće i povrće) u prvoj polovini 1986. godine bio je u opsegu 2–64% zavisno od vrste namirnica, ali i preko 470% za neka hraniva. Ovo pokazuje da se posebno u prva tri meseca posle akcidenta ne može zanemariti doprinos svih kratkoživećih radionuklida, ne samo <sup>131</sup>I, a u prve dve godine posle akcidenta ni doprinos tzv. srednje živećih radionuklida (<sup>134</sup>Cs, <sup>106</sup>Ru, <sup>102</sup>Rh)<sup>29</sup>.

Tokom 1986/87. godine merene su koncentracije radionuklida u uvoznim proizvodima: čokoladi, mleku u prahu i surutki, kao sirovinama za konditorske proizvode. U mleku u prahu izmerene su aktivnosti <sup>131</sup>I od (11–152) Bq/kg, <sup>134</sup>Cs od (6–557) Bq/kg, <sup>137</sup>Cs od (4–1 300) Bq/kg, a u uzorcima surutke: <sup>134</sup>Cs i <sup>137</sup>Cs do 1 000 Bq/kg. U čokoladi, čokokremu i hrani za bebe aktivnost <sup>137</sup>Cs bila je ispod 90 Bq/kg, sa izuzetkom uvozne austrijske čokolade (do 250 Bq/kg)<sup>28</sup>.

Ukupna efektivna godišnja doza od  $^{137}\text{Cs}$  koju je stanovništvo bivše Jugoslavije primilo tokom 1986. godine procenjena je na 0,66 mSv<sup>30</sup>, dok je stanovništvo Srbije putem ingestije i inhalacije tokom 1986. godine prema proceni primilo efektivnu godišnju dozu ispod 1 mSv<sup>15,28</sup>.

#### *Radioaktivna kontaminacija biljaka kao posledica nuklearne nesreće u Černobilju*

Godišnje doba (proleće 1986) nuklearne nesreće u elektrani u Černobilju uticalo je na kontaminaciju biljaka i shodno tome i namirnica biljnog i životinjskog porekla, s obzirom da je biljni pokrivač u trenutku nesreće bio u fazi vegetacije. Neposredno posle akcidenta zeleno povrće, trava i medonosne biljke predstavljale su značajan put unošenja kratkoživećih radionuklida u organizam životinja i čoveka, dok su se dugoživeći radionuklidi taložili na travi, šumskim biljkama i pašnjacima. Žitarice su uglavnom kontaminirane u kasnijoj fazi, usvajanjem cezijuma i stroncijuma iz tla<sup>3,28</sup>. Osnovni pokazatelji zagađivanja biljaka bili su  $^{131}\text{I}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , prvi zbog visoke koncentracije i fiziološkog značaja, drugi zbog perioda poluraspada. Srednja brzina depozicije na travnatom pokrivaču za većinu evropskih zemalja bila je u opsegu (0,03–0,11) cm/s za  $^{137}\text{Cs}$  i (0,13–0,15) za  $^{131}\text{I}$ , a maksimalne koncentracije cezijuma u Evropi bile su reda veličine nekoliko kBq/m<sup>2</sup>. Procenat retencije (frakcije zadržane aktivnosti na travnatom pokrivaču) za većinu kratkoživećih radionuklida bio je u opsegu 20–60%, dok je efektivno vreme uklanjanja sa travnatog pokrivača usled vremenskih faktora bilo osam dana za  $^{131}\text{I}$  i do 14 dana za  $^{137}\text{Cs}$ <sup>31</sup>.

Apsorpcija  $^{137}\text{Cs}$  preko lista, cveta i stabljike iz tla procenjena je na 5–10% za žitarice i 1–2% za zeljaste biljke. Fertilizacija kalijumom obradivog zemljišta pokazala je veoma dobre rezultate – usvajanje cezijuma smanjeno je i do 80%, ali je upotreba zeolita u iste svrhe praktično bila bez efekta. Gljive, mahovine i lišajevi su se pokazali kao dobri bioindikatori kontaminacije, posebno cezijuma: neposredno posle akcidenta koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  bila je i do 20 kBq/kg, a 1990. godine 80% tzv. černobiljskog cezijuma još uvek se nalazilo u površinskom sloju zemljišta u oblastima pokrivenim mahovinom<sup>31</sup>.

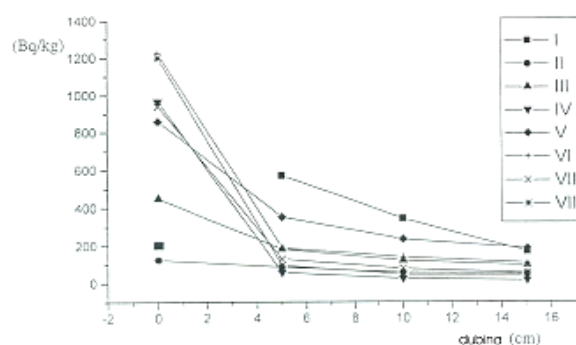
#### *Transport $^{137}\text{Cs}$ u sistemu „zemlja–biljke–med“ u planinskim regionima Srbije*

Transport  $^{137}\text{Cs}$  u sistemu „zemlja–medonosna flora–med“ za različite vrste zemljišta ispitan je u regionu planine Tara (1 280 m), Šara (2 000 m) i Stara planina (1 640 m). Sa lokacija na različitim nadmorskim visinama uzimani su uzorci zemljišta, trave, livadske flore, endemskih biljnih vrsta, mahovina i lišajeva. Pre 1986. godine aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  je u zemljištu u Srbiji bila je ispod 5 Bq/kg, a u najvećem broju biljaka, sem mahovina i lišajeva, cezijum se nije mogao detektovati. Neposredno posle akcidenta u pojedinim vrstama biljaka mogle su se izmeriti koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  i do 3 kBq/kg, a površinska kontaminacija tla bila je veoma nehomogena. Ispitivanjem zemljišta na Tari 1991. godine utvrđeno je da je u škrljcima koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  i do nekoliko stotina Bq, a u krečnjačkom zemljištu ispod 100 Bq, zavisno od

dubine, dok su u mahovinama i lišajevima izmerene koncentracije (8–18) kBq/kg suve mase<sup>20</sup>.

U regionu planine Šare 1997. godine  $^{137}\text{Cs}$  je u zemljištu bilo do 270 Bq/kg, u biljkama do 200 Bq/kg, u mahovinama međutim i do 3 kBq/kg. U leto 2000. godine na Staroj planini u površinskim slojevima tla tzv. matu izmerene su koncentracije cezijuma do 50 Bq/kg, zavisno od nadmorske visine i lokalne konfiguracije terena. Transfer faktor zemljište–biljke bio je u opsegu 0,1–2,0, za mahovine i lišajeve 3,0–10,0, zavisno od vrste zemljišta i morfologije biljaka<sup>32</sup>.

Ispitivanje vertikalne raspodele koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu (slika 3) pokazalo je da se do 1996. godine černobiljski cezijum zadržao u prvih 15 cm tla, odnosno da je migracija sporija nego što modeli predviđaju, sem na obalama potoka i reka zbog efekta spiranja. Uopšte, na migraciju cezijuma sem fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta pre svega utiče lokalna konfiguracija terena<sup>33</sup>.



Sl. 3 – Vertikalna distribucija  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu

Tokom akcidenta med se pokazao kao dobar bioindikator radiokontaminacije životne sredine. Tokom 1986. godine u 90% uzoraka meda iz Srbije detektovani su kratko i srednježiveći radionuklidi: osim  $^{131}\text{I}$  (max koncentracija 940 Bq/kg), njihova aktivnost (1–70) Bq/kg varirala je zavisno od mesta uzorkovanja, tipa zemljišta, vremena uzorkovanja i vrste meda. Maksimalna aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  izmerena je decembra 1986. godine (101 Bq/kg) u livadskom medu, ali već 1987. godine aktivnost cezijuma bila je na nivou pre akcidenta. Izmerena aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u medu 1988. godine bila je ispod 2,4 Bq/kg, dok su se od kratkoživećih radionuklida 1990. godine u medu mogli detektovati  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  i  $^{144}\text{Ce}$ . U nekim uzorcima se u koncentracijama ispod 1 Bq/kg moglo detektovati i  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ , iz materijala za gašenje reaktora<sup>34,35</sup>.

#### **Procena zdravstvenog rizika**

Istraživanja tokom i neposredno posle akcidenta ukazala su i na kontaminaciju radnika u fabrikama stočne hrane, koji su radili sa visoko kontaminiranim sirovinama (lucerka). Koncentracija radionuklida u dehidriranoj lucerki (brašno i pelete) bila je u opsegu:  $^{131}\text{I}$  – 25–35 kBq,  $^{134}\text{Cs}$  – 3–4 kBq,  $^{137}\text{Cs}$  – 5,6–8,3 kBq,  $^{103}\text{Ru}$  – 15–22 kBq. Procenjena jačina ekspozicione doze za kritična radna mesta prema tehnološkom procesu proizvodnje (doprinos od inhalacije i ingestije radioaktivne

prašine nije procenjivan) bila je (2–1 000) pC/kgs, odnosno efektivna ekvivalenta doza za osam časova (1,4–711)  $\mu\text{Sv}$  (za 200 radnih dana od 0,3 mSv do 142 mSv)<sup>27</sup>. Kod ovih podataka treba imati u vidu da se radi o visokim koncentracijama koje su izmerene u hrani i hranivima. Kod procene efektivne doze uzima se u obzir, pored organa, i biološko vreme poluraspada, tj. vreme eliminacije radionuklida iz organizma putem urina, fecesa i sl.

Ukupna efektivna godišnja doza od  $^{137}\text{Cs}$  koju je stanovništvo bivše Jugoslavije primilo tokom 1986. godine procenjena je na 0,66 mSv<sup>30</sup>, dok je stanovništvo Srbije putem ingestije i inhalacije tokom 1986. godine, prema proceni, primilo efektivnu godišnju dozu ispod 1 mSv<sup>15,28</sup>. S obzirom na ove vrednosti ne bi trebalo očekivati značajniji uticaj na zdravlje stanovništva u celini, osim kod lica koja su neposredno tih dana bila izložena padavinama.

## L I T E R A T U R A

1. Turai I, Veress K. Radiation accidents: occurrence, types, consequences, medical management and the lessons to be learned. CEJOEM 2001; 7(1): 3–14.
2. Proceeding of International Conference, Vienna 1996: Chernobyl Ten Years on. Radiological and Health Impact OECD/NEA. Available from: <http://www.nea.fr/html/rp/chernobyl/references.html>
3. International Agency of Atomic Energy. Summary Report on Post Accident Review Meeting on Chernobyl Accident, Vienna, 1986. Available from: <http://www.davistown-museum.org/cbm/Rad7.html>
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report on Exposures from the Chernobyl Accident. Vienna, 1988. Available from: <http://www.most.go.kr/inforoom/nuclear/event/gita-6-8.hwp>
5. Spasić V, Bek-Užarov Đ. Current problems of legal meteorology in the field of the ionizing radiation through the program of the Board for ionizing radiation Council for meteorology SFRJ. Proceedings of the II Conference of the Yugoslav Board for prevention of the radiation and radiation exposure from nature environment and evaluation of the radiation risks. 1986, oct, Kragujevac, Yugoslavia. p. 165–8. (Serbian)
6. Spasić V, Bek-Užarov Đ, Boreli F. Proceedings of the II Conference of the Yugoslav Board for prevention of the radiation and radiation exposure from nature environment and evaluation of the radiation risks. 1986, oct, Kragujevac, Yugoslavia. p. 143–6. (Serbian)
7. Spasić V. The influence on the measurement of the low activities from environment. Proceedings of the XII Conference JUKEM, 1986 oct. 29–31, Belgrade, Yugoslavia. p. 522–6. (Serbian)
8. Spasić V. The values and units in the ionizing radiation field. Proceedings of the XI JUREMA Conference about measurements. apr. 1987, Tuheljske Toplice, Croatia. p. 77–80. (Serbian)
9. Spasić V, Paligorić D, Novković D. Unique measurement security in the radioactivity field. Proceedings of the XIV Yugoslav Conference for radiation protection. jun 1987. Novi Sad, Yugoslavia. p. 423–8. (Serbian)
10. Spasić V. Standards and measures for ionizing radiation. Proceedings of the Conference of the Ionizing Radiation – measurements and protection. 1987, Belgrade. p. 61–88. (Serbian)
11. Spasić-Jokić V, Popović D, Đurić G. The measurement of the radionuclide activity in the samples from the environment: questionnaire data analysis about technical features of measures and conditions of the activity measurements. Proceedings of the Measurements and measure equipment, 1988, Belgrade. p. 735–41. (Serbian)
12. Spasić-Jokić V, Popović D, Đurić G. Security of the quality and the quality control in the environment radiation protection – metrological system and legislation. Proceedings of the Ecological truth – scientific approach. 2004, Borsko Jezero, Serbia. p. 389–91. (Serbian)
13. Kandić A, Spasić-Jokić V, Todorović D. Intercomparison of the semiconductor HPGe detectors. Proceedings of the XVII Yugoslav Conference of the radiation protection. may 1993, Vinča, Belgrade. p. 195–8. (Serbian)
14. Spasić V. Officially verification and regulatory papers for semiconductor gamma ray spectrometers. XIV Regional congress of IRPA, Zbornik radova, Kupari: 1987. p. 425–8.
15. Đurić G, Petrović B, Popović D, Šmelcerović M, Đujić I. Monitoring system in the Radiation Protection Laboratory, Faculty of Veterinary Medicine, Belgrade, after the nuclear plant accident at Chernobyl: Proceedings of the 2nd Symp. of Yug. Radiat. Protect. Assoc: Exposures from natural radiation, Kragujevac, Serbia, 1987. p. 169–75.
16. Đurić G, Čupić Z, Popović D, Šmelcerović M. Criteria for fast evaluation of radionuclides content in meat. Acta Veterinaria 1991; 41(5–6): 109–14.
17. Petrović B, Šmelcerović M, Đurić G, Popović D. Radiocontamination of agricultural workers due to nuclear accidents. Boris Kidrič Institute of Nuclear Science. Radiation Protection – Selected Topics 1989: 427–31.
18. Đurić G, Popović D, Šmelcerović M, Petrović B, Đujić I. Radioactive contamination of food and forage in Serbia after the Chernobyl accident. Boris Kidrič Institute of Nuclear Science. Radiation Protection – Selected Topics 1989: 421–26.
19. Todorović D, Radenković M, Popović D. Radionuclides in the ground air stratum in the urban regions. Proceedings of the XII JDZZ, 2003. Petrovac, Montenegro. p. 176–9. (Serbian) Available from: <http://www.JDZZ.org.yu/petrovac.html>
20. Đurić G, Popović D, Šmelcerović M, Sarvajić A, Ivanković S, Milić N. Exposures and absorbed doses on the meadows of Mt. Tara. Veterinary Courier 1992; 46(9): 491–7.
21. Todorović D, Popović D, Đurić G. Activity of  $^{137}\text{Cs}$  in air before and after nuclear plant accident at Chernobyl. Vinča Bulletin 1997; 2 suppl 1: 635–8.
22. Popović D, Đurić G, Šmelcerović M, Maksimović B. Contribution of the short lived radionuclides in food to the total radiation burden of man after the nuclear accident in Chernobyl. Boris Kidrič Institute of Nuclear Science. Radiation Protection – Selected Topics, 1989: 416–20.
23. Pantelić G, Popović D, Maksić R, Orlić M, Pavlović R, Pavlović S. Experiences and Consequences of the Chernobyl Accident. In: Ten years after Chernobyl accident, INN Vinča. p. 27–44. Available from: <http://www.vin.bg.ac.yu>
24. Čonkić Lj, Škerbić Ž, Slivka J, Vesković M, Bikić I. Elimination of long lived fission products from river sediments. Water Research 1990; 24: 333–6.
25. Đurić G, Petrović B, Šmelcerović M, Popović D. Radioactive contamination in Children Summer Resorts Area on Tara and Divčibara in May. Veterinaria 1988; 37(4): 555–60.
26. Đurić G, Popović D, Popesković D. Level of natural and fallout radionuclides in honey. Acta Veterinaria 1988; 38(5–6): 293–8.
27. Petrović B, Đurić G, Popović D, Kraljević P. Maximum permissible levels of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in feeds. Veterinaria 1988; 37(4): 509–11.

28. Đurić G, Popović D. Gamma contamination food factor for milk powder and whey. *Acta Veterinaria* 1997; 47(4): 245–50.
  29. Popović D, Đurić G, Smelcerović M. Short-lived radionuclides in food and feed after the nuclear accident in Chernobyl. *Acta Veterinaria* 1995; 45(5–6): 337–40.
  30. Maksić R, Radmilović V, Pantelić G, Brnović R, Petrović J. Irradiation of population in the Republic of Serbia after Chernobyl accident Proceeding of the One decade after Chernobyl: summing up the consequences of the accident; 1997, Vienna, (IAEA). p. 299–302.
  31. Đurić G, Popović D. Radioactive Contamination of Plants. *Ecologica* 1994; 1(2): 19–24.
  32. Đurić G, Popović D, Todorović D. Activity variations and concentrations factors for natural radionuclides in a "soil-plant-honey" system. *Environment Inter* 1995; 22(1): 361–3.
  33. Popović D, Đurić G, Todorović D. Natural and fallout radionuclides in different types of honey. *Journal of Environmental Biology* 1996; 17(4): 339–43.
  34. Đurić G, Popović D. Fission products in the environment after the nuclear plant accident in Chernobyl, In: Ten Years After Chernobyl. Proceedings IAEA/who/ec international conference, Vienna, april 1996. p. 67–72.
  35. Popović D, Đurić G, Todorović D. Chernobyl fallout radionuclides in soil, plant and honey of a mountain region, In: A Decade After Chernobyl proceedings/IAEA/who/ec international conference, Vienna, april 1996. p. 432–37.
- Rad je primljen 14. III 2006.