

Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

**Монографија**  
**ЧЕРНОБИЉ**  
**30 година после**

Уредник  
др Гордана Пантелић

Београд  
2016

Монографија: **ЧЕРНОБИЉ 30 година после**

Издавач: Институт за нуклеарне науке „Винча“, Лабораторија за  
заштиту од зрачења и заштиту животне средине  
„Заштита“  
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За издавача: др Борислав Грубор

Рецензенти: др Оливера Цирај Бјелац  
др Иштван Бикит  
др Владимир Удовичић  
др Невенка Антовић  
др Ивана Вуканац  
др Драгослав Никезић  
др Душан Мрђа  
др Марија Јанковић  
др Јелена Крнета Николић

Уредник: др Гордана Пантелић

Лектор/коректор: Мариола Пантелић, MSc

Објављивање монографије помогли:  
Министарство просвете, науке и технолошког развоја

ISBN 978-86-7306-138-2

Штампа: Штампарија Института за нуклеарне науке „Винча“, 522,  
11001 Београд, Тел. 011-8066-746

Тираж: 150 примерака

## DISTRIBUCIJA $^{137}\text{Cs}$ U OBRADIVOM ZEMLJIŠTU

Ivana Ž. VUKAŠINOVIĆ<sup>1</sup>, Miloš B. RAJKOVIĆ<sup>1</sup> and Dragana J. TODOROVIĆ<sup>2</sup>

1) Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni Fakultet, Beograd-Zemun, Srbija

2) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Republika Srbija

### Rezime

Usled padavina koje su usledile nakon Černobilskog akcidenta 1986. godine, proizvedeni radionuklid  $^{137}\text{Cs}$  je deponovan u zemljištu. S obzirom na njegovo dovoljno dugo vreme poluraspada (30,05 godina), posebno je važna radiološka zaštita kultivisanog (obradivog) zemljišta jer se postavlja pitanje da li se ovaj radionuklid zadržava u površinskim slojevima zemljišta, da li biva usvojen od strane biljaka ili se spušta u dublje slojeve zemljišta. U ovom radu prikazani su rezultati merenja specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  metodom gama-spektrometrije u zemljištu 15 godina starog voćnjaka pod zasadam breskvi. Priprema zemljišta za sadnju bresaka izvršena je rigolovanjem, posle čega je usledila 12 godina duga nega voćnjaka, a zatim uzorkovanje zemljišta je izvršeno tri godine nakon prestanka svih poljoprivrednih tretmana. U radu je prikazan pregled rezultata analize uticaja dugogodišnje kultivacije (obrađivanja) zemljišta na preraspodelu  $^{137}\text{Cs}$  duž profila dubine 0-80 cm. Linearna i višestruka regresiona analiza primenjene su da bi se procenilo u kojoj meri su nivoi radioizotopa cezijuma povezani sa: nivoima izotopa kalijuma  $^{40}\text{K}$  detektovanim u zemljištu; zatim, osnovnim osobinama koje karakterišu zemljište (pH, sadržaj humusa, sadržaj karbonata, granulometrijski sastav, sadržaj higroskopske vlage); mineralnim sastavom glinovite frakcije zemljišta i dostupnim sadržajima mikroelemenata (Zn, Cu, Mn, Fe). Obrasci distribucije  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom ukazivali su da je cezijum bio mehanički prenesen iz površinskih ka nižim slojevima zemljišta tokom kultivacije. Rezultati analiza su pokazali da na zatečenu distribuciju izotopa cezijuma sa dubinom glavni uticaj imaju varijacije sadržaja humusa i minerala glinovite frakcije zemljišta, vermikulita, ilita i smektita.

### 1. UVOD

Prirodni cezijum sastoji se od jednog stabilnog izotopa ( $^{133}\text{Cs}$ ), dok su ostali (od ukupno 22) veštačkog porekla i u prirodi se pojavljuju uglavnom kao rezultat antropogene aktivnosti. Za proizvedeni radionuklid  $^{137}\text{Cs}$  se smatra da u životnoj sredini većinom potiče od radioaktivnih padavina proizvoda nuklearne fisije nastalih kao posledica Černobiljskog akcidenta 1986. godine, a do tog trenutka se pojavljuje kao rezultat intenzivnih nuklearnih proba u atmosferi.  $^{137}\text{Cs}$  je biološki značajan radionuklid s obzirom na svoje dovoljno dugo vreme poluraspada (30,05 godina) koje mu obezbeđuje prisustvo u lancima ishrane. Uključivanje u lanac ishrane potiče prvenstveno iz zemljišta, pa je fokus mnogih studija ponašanje  $^{137}\text{Cs}$  u kultivisanom (obradivom) zemljištu [1-5]. Glavni mehanizmi taloženja  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu su suva i vlažna depozicija („fallout“). Po kontaminaciji, nakon taloženja iz atmosfere, visoka aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  zastupljena je u površinskim slojevima zemljišta i sa dubinom profila ona brzo eksponencijalno opada [4,5]. Duž neobrađivih (nekultivisanih) profila zemljišta cezijum nije ravnomerno

raspoređen, a tokom vremena, njegovo kretanje u dublje slojeve postaje sporije pri čemu vertikalna migracija zavisi od fizičko-hemijskih interakcija sa datim matriksom zemljišta [6-8]. Duž obradivih (kultivisanih) profila zemljišta,  $^{137}\text{Cs}$  se takođe neravnomerno raspoređuje. U ovom slučaju, u procesu obrade zemljišta dolazi do mešanja (rotiranja) slojeva zemljišta, prvobitna zemljišna struktura biva poremećena i radiocezijum se mehanički preraspodeljuje. Dubina do koje će cezijum biti dodatno distribuiran zavisice od stepena obrade zemljišta pri čemu se njegova raspodela može izraziti različitim funkcijama opadajućeg trenda sa dubinom [4,5]. Obradivanje zemljišta koje se nastavi tokom dužeg vremenskog perioda dovešće do uniformne distribucije  $^{137}\text{Cs}$  duž dubine oranja [8].

Radiocezijum se u zemljištu vezuje za čestice zemljišta ili se pojavljuje u obliku zemljišnih rastvora. Na njegovu mobilnost u zemljištu utiču: *a*) retenzija cezijuma nastala kao rezultat interakcije matriksa i vlažnosti zemljišta, *b*) fizičko-hemijska svojstva zemljišta kao što su mehanički sastav, pH reakcija, sadržaj organskih materija, mineraloški sastav i *c*) procesi i elementi (korenov sistem, sastav mikroorganizama) biološkog porekla koji se odvijaju u zemljištu [8-10].

Iako se smatra da je rastvorljivost radioaktivnog cezijuma visoka, radiocezijum „u suštini nije dostupan i 95%  $^{137}\text{Cs}$  je nepovratno podložno sorpciji u zemljištu čak i pod uslovima koji teorijski povećavaju oslo bađanje“ [3].  $^{137}\text{Cs}$  prisutan u zemljištu može da bude apsorbovan na organskim česticama (huminske materije) i frakcijama gline, praha i peska [9-11]. Sposobnost minerala gline da fiksiraju  $^{137}\text{Cs}$  ključno utiče na njegovu pojavu u zemljišnim rastvorima pa time i na vertikalnu mobilnost i transfer iz zemljišta u biljke. Sorpcija  $^{137}\text{Cs}$  je najveća na mineralima gline bogatim kalijumom, naročito na ivicama međuslojeva („frayed edge sites“) glina tipa kristalne rešetke 2:1 koja su dostupna samo monovalentnim katjonima sa niskom energijom hidratacije (npr. K, Cs, Rb) [7,8]. S obzirom da cezijum nije esencijalni element u ishrani biljaka za razliku od svog geohemijskog analoga kalijuma, čiji su  $\text{K}^+$  joni normalno prisutni u obradivom zemljištu, utvrđeno je da od koncentracije kalijuma u zoni rizosfere zavisi usvajanje Cs od strane korena [11]. Konačno, procenjuje se da je u obradivom zemljištu oko 10% i 20% ukupnog  $^{137}\text{Cs}$  sadržano u razmenljivim i organskim, a oko 70% u rezidualnim frakcijama zemljišta [12].

Aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu u Srbiji pre 1986. godine bila je ispod 5 Bq/kg, a posle akcidenta u Černobilju karakteriše je izrazito nehomogena raspoređenost u tlu [13,14]. Ispitivanjem zemljišta planinskih predela utvrđeno je da su koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  u škriljcima bile više (462 Bq/kg) nego u krečnjačkom zemljištu (88 Bq/kg) na planini Tara, 1991. godine, koje se nisu bitno razlikovale od maksimalno izmerene vrednosti od 270 Bq/kg izmerenim na planini Šara, 1997. godine, a niže vrednosti, koje su bile manje od 87 Bq/kg izmerene su 2000. godine na Staroj planini [13]. Ispitivanje vertikalne raspodele koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu pokazalo je da se do 1996. godine černobiljski cezijum zadržao u prvih 15 cm tla [13]. U periodu 2003-2008. godine u Srbiji, nivo izotopa cezijuma u blizini termoelektrana na ugalj nalazio se u intervalu 3-68 Bq/kg, a u urbanim područjima u periodu 2001-2007. godine u intervalu 4-70 Bq/kg, a navedene razlike su tumačene kao rezultat različitog tipa, geološkog porekla i potencijalnog obrađivanja zemljišta [13]. Na području Beograda (2008. godine) zabeležene su specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (u intervalu 0,30-160 Bq/kg) neobrađivih profila zemljišta različitog tipa i dubine 0-50 cm, pri čemu je u svakom profilu vrednost manja od 10 Bq/kg detektovana na dubini ispod 25 cm [14].

U ovom radu prikazan je pregled rezultata merenja specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nakon 22 godine od akcidenta u Černobilju u profilima zemljišta dubine 0-80 cm sakupljenih sa

voćnjaka pod zasadam breskvi na oglednom školskom poljoprivrednom dobru „Radmilovac” (Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu). Takođe, prikazani su rezultati analize uticaja dugogodišnje obrade na preraspodelu  $^{137}\text{Cs}$  duž profila zemljišta. Linearna i višestruka regresiona analiza su bile primenjene da bi se procenilo u kojoj meri su nivoi radioizotopa cezijuma povezani sa: *a*) nivoima izotopa kalijuma  $^{40}\text{K}$  detektovanim u zemljištu; *b*) osnovnim osobinama koje karakterišu zemljište (pH, sadržaj humusa, sadržaj karbonata, granulometrijski sastav, sadržaj higroskopske vlage); *c*) mineralnim sastavom glinovite frakcije zemljišta i *d*) dostupnim sadržajima mikroelemenata (Zn, Cu, Mn, Fe).

## 2. MATERIJALI I METODE

*Uzorkovanje zemljišta.* Voćnjak pod zasadam breskvi, školskog poljoprivrednog dobra „Radmilovac“, Poljoprivrednog Fakulteta, Univerziteta u Beogradu je bio mesto uzorkovanja četiri profila zemljišta, u leto 2008. godine. Godine 1992., dubokim oranjem (rigolovanjem) do dubine od 1 m prirodnog zemljišta tipa *černozem* izmenjene su endomorfološke karakteristike zemljišta. Pri tome je formirano antropogeno zemljište tipa *antrosol* prema međunarodnoj FAO klasifikaciji [15]. Voćnjak je kultivisan i tretiran fosfatnim đubrivima u periodu od 12 godina. Zatim, posle perioda od tri godine u kome nikakvi tretmani voćnjaka (oranje, đubrenje, irigacija) nisu primenjivani pristupilo se kolekciji uzoraka jer je struktura zemljišta bila dovoljno stabilna da bi se ustanovile osobine formiranog *antrosola*. Uzorci zemljišta sakupljeni su iz Ap-horizonta moćnosti 80 cm na svakih 20 cm (gornji sloj dubine 0-20 cm, slojevi u zoni korenovog sistema 20-40 cm i 40-60 cm i donji sloj 60-80 cm). Tri profila zemljišta (**P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**, **P<sub>3</sub>**) otvorena su u blizini korena stabla breskve, a četvrti (**P<sub>4</sub>**) sa dela zemljišta pokrivenog travom, van korenovog sistema.

*Analize osobina zemljišta.* U cilju pripreme 16 uzoraka zemljišta za merenje vršeno je vazdušno sušenje uzoraka, a zatim je zemljište prosejavano kroz sito promera 2 mm. Standardne tehnike analize zemljišta korišćene su za određivanje hemijskih i fizičkih osobina: mehanički sastav prema metodi prosejavanja i sedimentacije (pipet metod), zemljišna kiselost u vodi potenciometrijski, sadržaj kalcijum-karbonata pomoću Šajblerovog kalcimetra i sadržaj humusa metodom Tjurina.

*Gama-spektrometrijska merenja.* Za određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida primenjen je metod gama spektrometrije. Uzorci zemljišta pakovani su u Marineli posude zapremine 500 cm<sup>3</sup>, zapečaćeni pčelinjim voskom i čuvani 4 nedelje radi dostizanja radioaktivne ravnoteže. Korišćen je koaksijalni detektor *p*-tipa (Canberra Industries, Inc., Meriden, CT, USA) relativne efikasnosti 20% i energetskom rezolucijom 1,8 keV na energiji 1332 keV izotopa  $^{60}\text{Co}$ . Referentni materijal matriksa zemljišta (National Office of Measures OMH, Budapest) u geometriji Marineli posude zapremine 500 cm<sup>3</sup> sa homogeno raspoređenim radionuklidima ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  i  $^{137}\text{Cs}$ ) ukupne aktivnosti 1,5 kBqkg<sup>-1</sup> na dan 01.07.1991. korišćen je za kalibraciju efikasnosti detektora. Merenje je vršeno u intervalu vremena 70000 s. Spektar je analiziran standardnim softverskim paketom *Genie 2000*. Aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{40}\text{K}$  određena je na osnovu njihovih  $\gamma$  – energije 661,66 keV i 1460 keV, respektivno. Ukupna eksperimentalna neodređenost metoda iznosila je 10%.

*Analize mineraloškog sastava.* U cilju određivanja mineraloškog sastava zemljišta primenjena je metoda rendgenske difrakcije. Ovom metodom su ispitivani uzorci glinovite frakcije zemljišta profila **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>** i **P<sub>3</sub>** koja je prethodno dobijena mehaničkom analizom. Izvršeno je snimanje orijentisanog uzorka, uzorka zasićenog etilen glikolom i

žarenog uzorka na 550°C. Rendgenski dijagrami praha snimljeni su krišćenjem rendgenskog difraktometra za prah Philips (PW-1010).

*Analize pristupačnih sadržaja mikroelemenata.* Sadržaji pristupačnih elemenata Fe, Mn, Cu i Zn u zemljištu dobijeni su ekstrakcijom sa rastvorom 0,005 MDTPA i analizirani metodom atomske apsorpcione spektrofotometrije korišćenjem uređaja Varian SpectrAA 250 plus.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

#### 3.1. Karakteristike ispitivanog zemljišta

U tabeli 1 predstavljeni su rezultati merenih veličina duž profila zemljišta **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**, **P<sub>3</sub>** i **P<sub>4</sub>** u intervalima dubine 20 cm čije vrednosti su preuzete iz naših prethodnih istraživanja istog *antrosola* [16-19]. Merene su vrednosti specifične aktivnosti (Bq kg<sup>-1</sup>) radionuklida <sup>137</sup>Cs i <sup>40</sup>K [16-17], glavnih osobina zemljišta (pH, sadržaj humusa, sadržaj karbonata, mehanički (granulometrijski) sastav i sadržaj higroskopske vlage) [16], zatim procentualni mineralni sastav glinovite frakcije zemljišta [18], kao i pristupačni sadržaji mikroelemenata (mg kg<sup>-1</sup>) Zn, Cu, Mn i Fe [19]. Vrednosti specifične aktivnosti su predstavljene u obliku “merena vrednost ± ekperimentalna nesigurnost”.

Na osnovu osobine zemljišta može se zaključiti da se profili međusobno bitno ne razlikuju i da ih karakteriše ista praškasto-glinasta tekstura. Sadržaj gline (čestice dimenzija < 0,002 mm) varira od 33,08 do 43,33%, a peska (čestice dimenzija > 0,05 mm) od 2,18 do 16,12%. Primećuje se izlučivanje čestica gline u zoni korenovog sistema (20-60 cm) i njihova akumulacija u dubljim slojevima, a trend je suprotan u slučaju krupnih čestica kao što je pesak. U poređenju sa ostalim profilima kod kojih je sadržaj karbonata mnogo manji, do 1%, profil **P<sub>2</sub>** sadrži 7-10% karbonata. Takva razlika uticala je na vrednosti pH, pa **P<sub>2</sub>** pokazuje alkalnu reakciju dok zemljište ostalih profila varira od slabo kisele do neutralne reakcije. Ukupno, sadržaj higroskopske vlage varira 18%. Sadržaj humusa značajno opada sa dubinom, i varira ukupno do 40% [16,17].

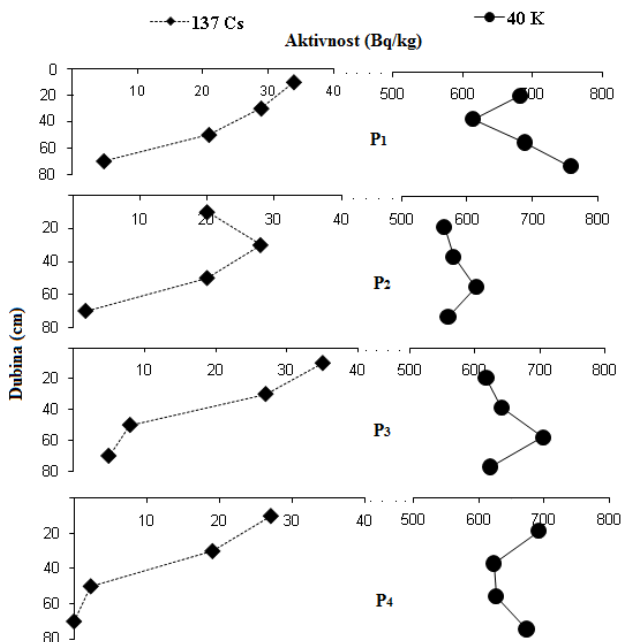
#### 3.2. Distribucija specifične aktivnosti <sup>137</sup>Cs

Specifične aktivnosti <sup>137</sup>Cs u zemljištu nalazile su se u intervalu (Bq kg<sup>-1</sup>): 1,8-35,0 i bile u skladu sa regionalnim nivoima radiocezijuma u zemljišta [13,14]. Sa slike 1 može se videti da koncentracija aktivnosti cezijuma varira na sličan način duž slojeva profila zemljišta **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>** i **P<sub>3</sub>** s obzirom da se kod njih značajan nivo cezijuma našao u dubljim slojevima (40-60 cm). Na osnovu koficijenta varijacije specifične aktivnosti može se pretpostaviti da je uticaj mehaničke obrade postojao duž profila **P<sub>1</sub>** i **P<sub>2</sub>** i u manjoj meri duž **P<sub>3</sub>**, gde su varijacije cezijuma iznosile ~60% i ~80%, respektivno. To se može zaključiti i na osnovu distribucija u **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>** i **P<sub>3</sub>** koja se razlikovala od one tipične za nekultivisana zemljišta u kojima je <sup>137</sup>Cs koncentrisan u gornjem sloju dubine 20 cm i koji brzo eksponencijalno opada sa dubinom [14], a odgovarala je profilu **P<sub>4</sub>** (uzorkovanom van zone rizosfere) u kome cezijum varira ~100% i postaje manji od minimalne detektabilne koncentracije (MDC) na dubini 60-80 cm (Slika 1). Konačno, distribucija koncentracije aktivnosti radiocezijuma Cs (Bq kg<sup>-1</sup>) na datoj dubini z (cm) zemljišta mogla je biti opisana jednačinom predloženom za kultivisana zemljišta [5]:

$$Cs = a \cdot (1 - z/H)^b \quad (1)$$

čiji su koeficijenti  $a > 1$  i  $0 < b < 1$ . Smatrajući da ukupna dubina sloja  $H$  (cm) u kome cezijum može biti detektovan u ovom zemljištu iznosi 85 cm, dobijeni koeficijenti fita jednačine (1) iznosili su  $a = 38$  i  $b = 0,81$  [17]. Jednačina (1) opisuje 76% varijacija cezijuma sa dubinom ( $p < 0,05$ ), i pokazuje da ako obrada zemljišta bude nastavljena distribucija cezijuma postaje više uniformna ( $b \rightarrow 0, Cs \rightarrow a$ ).

Može se ovakva raspodela proizvedenog radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  uporediti sa raspodelom primordijalnog radionuklida  $^{40}\text{K}$ , izotopa kalijuma, u zemljištu veoma rasprostranjenog, ali u različitoj meri u zavisnosti od prirode stena koje su učestvovalе u genezi datog zemljišta. Specifične aktivnosti  $^{40}\text{K}$  nalazile su se u intervalu 565-755  $\text{Bq kg}^{-1}$  i bile u skladu sa vrednostima gama-zračenja terestrijalnog porekla u intervalu 140-850  $\text{Bq kg}^{-1}$  preporučenim za  $^{40}\text{K}$  [1]. Sa slike 1 može se videti da je distribucija  $^{40}\text{K}$  u profilima zemljišta duž 80 cm dubine konstantna. Specifične aktivnosti među profilima se ne razlikuju značajno ( $\text{CV} \sim 4\text{-}8\%$ ) i sve razlike su u okviru eksperimentalne nesigurnosti određivanja aktivnosti ovog radionuklida. Kao i većina kalijuma,  $^{40}\text{K}$  je homogeno distribuiran po dubini zemljišta jer pripada mineralnim komponentama zemljišta [16]. Sadašnja distribucija  $^{40}\text{K}$  se koristi kao referentna pri analiziranju ponašanja  $^{137}\text{Cs}$  u datom zemljištu i može da služi kao aproksimacija buduće raspodele cezijuma nastale posle dovoljno dugog vremena [8]. U ovom trenutku, linearna korelacija između  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{40}\text{K}$  nije mogla biti uspostavljena s obzirom na značajne razlike njihovog porekla u zemljištu (antropogeno odnosno prirodno).



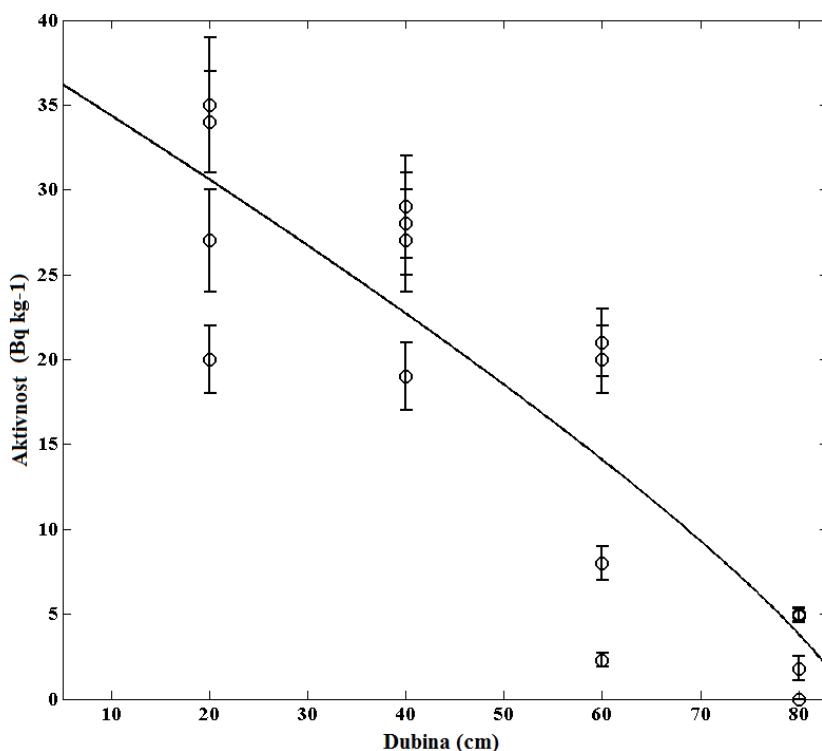
Slika 1. Promene specifičnih aktivnosti proizvedenog  $^{137}\text{Cs}$  i prirodnog  $^{40}\text{K}$  duž ispitivanih profila zemljišta (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> i P<sub>4</sub>) dubine 0-80 cm sa korakom od 20 cm.

Tabela 1. Osobine zemljišta, mineraloški sastav glinovite frakcije, specifične aktivnosti (Bq kg<sup>-1</sup>) <sup>137</sup>Cs i <sup>40</sup>K i pristupačni sadržaji mikroelemenata (mg kg<sup>-1</sup>) Zn, Cu, Mn i Fe ispitivanih profila zemljišta P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub> u intervalima dubine 20 cm [16-19].

Dubina (cm)	pH <sub>so</sub>	H <sub>2</sub> O (%)	Sadržaj karbonata (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) (2-0,05 mm)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) (0,05-0,002 mm)	Glin (%) (<0,002 mm)	Higroskopna влага (%)	Glinovita frakcija zemljišta				<sup>137</sup> Cs (Bq kg <sup>-1</sup> )	<sup>40</sup> K (Bq kg <sup>-1</sup> )	Pristupačni sadržaji mikroelemenata			
								Ili (%)	Silikati (%)	Vertikalit (%)	Oxali* (%)			Zn (μg kg <sup>-1</sup> )	Cu (μg kg <sup>-1</sup> )	Mn (μg kg <sup>-1</sup> )	Fe (μg kg <sup>-1</sup> )
<i>Profil 1 (P<sub>1</sub>)</i>																	
0-20	7,47	2,12	0,25	2,18	54,80	43,02	3,21	52	19	10	19	34 ± 3	683 ± 68	1,10	6,80	29,20	23,60
20-40	7,64	1,36	0,29	6,62	51,75	41,63	4,31	48	24	8	20	29 ± 3	615 ± 62	0,90	5,80	15,60	19,80
40-60	7,59	1,19	0,38	6,01	52,37	41,62	3,33	45	29	7	19	21 ± 2	689 ± 79	0,40	3,60	13,20	21,20
60-80	7,57	0,92	0,24	4,54	52,13	43,33	3,60	46	35	5	14	4,9 ± 0,7	755 ± 76	0,30	1,80	13,40	22,50
<i>Profil 2 (P<sub>2</sub>)</i>																	
0-20	8,16	1,27	9,04	12,31	52,98	34,71	2,82	47	17	8	28	20 ± 2	565 ± 56	0,50	3,80	16,40	7,20
20-40	8,27	1,1	7,98	12,46	54,39	33,15	2,90	45	24	7	24	28 ± 2	579 ± 58	0,60	5,00	14,80	7,80
40-60	8,32	0,73	9,04	16,12	50,69	33,19	2,90	41	22	9,5	27	20 ± 2	614 ± 61	0,40	3,60	11,80	7,00
60-80	8,29	0,48	10,3	13,19	53,45	33,36	2,92	42	29	7	22	1,8 ± 0,4	571 ± 58	0,20	1,20	9,20	5,80
<i>Profil 3 (P<sub>3</sub>)</i>																	
0-20	7,45	1,42	0,17	13,32	52,01	34,67	3,06	48	18	9	25	35 ± 4	617 ± 62	1,20	7,60	34,20	30,10
20-40	7,18	1,06	0,21	14,56	52,36	33,08	3,11	47	24	9	20	27 ± 3	641 ± 64	0,90	6,20	24,20	41,60
40-60	6,85	0,67	0,21	13,89	52,83	33,28	3,28	46	26	7	21	8,0 ± 1,0	705 ± 71	0,50	2,20	17,00	32,10
60-80	7,04	0,46	0,25	12,89	53,60	33,51	3,28	45	30	7	18	5,0 ± 0,6	624 ± 62	0,40	1,80	17,40	28,60
<i>Profil 4 (P<sub>4</sub>)</i>																	
0-20	7,71	2,8	1,03	5,33	55,92	38,75	1,38	-	-	-	-	27 ± 3	692 ± 69	1,30	5,40	14,60	25,40
20-40	7,82	1,97	0,98	9,61	52,60	37,79	0,98	-	-	-	-	19 ± 2	623 ± 62	1,20	3,80	11,40	15,40
40-60	7,95	1,64	0,63	5,97	55,71	38,32	1,22	-	-	-	-	2,3 ± 0,4	627 ± 63	0,30	1,20	10,00	13,80
60-80	7,94	1,03	0,46	8,22	56,30	35,48	0,94	-	-	-	-	<1,5	673 ± 67	0,20	1,00	11,80	14,60

\*Zbirni procenat udela minerala (pojedinačno zastupljenim < 9%): hlorit, MSS, kaolinit, kalcit, feldspar, kvarc





Slika 2. Raspodela specifične aktivnosti <sup>137</sup>Cs sa dubinom zemljišta [17]

### 3.3. Uticaj osobina zemljišta na distribuciju <sup>137</sup>Cs

Uticaj osobina zemljišta na varijacije koncentracije aktivnosti <sup>137</sup>Cs po dubini zemljišta analiziran je prostom linearnom regresijom [17]. Sa <sup>137</sup>Cs, samo je sadržaj humusa bio u korelaciji slabe jačine ( $r = 0,51$ ;  $p < 0,05$ ) opisujući 27% varijabilnosti cezijuma, ali ta veza je poboljšana ( $r = 0,82$ ;  $p < 0,001$ ) i opisivala 68% varijabilnosti kada je profil **P<sub>4</sub>** isključen iz analize. Zatim, rezultat višestruke linearne regresije pokazao je povezanost aktivnosti cezijuma i sa drugim osobinama zemljišta, a to su sadržaj humusa, gline i higroskopske vlage koje su opisivale 81% ponašanja cezijuma (tabela 2). Rezultati ove analize bili su u skladu sa literaturnim podacima na osnovu kojih je poznato da huminske materije u glinovitom zemljištu olakšavaju interakcije između rastvorljivih oblika radiocezijuma i čestica zemljišta što omogućava, iako veoma sporo, kretanje cezijuma ka dubljim slojevima zemljišta [17].

Higroskopska vlaga je definisana kao deo ukupne zemljišne vlage koja je čvrsto vezana na površini zemljišnih čestica adhezionim silama bez sposobnosti da isparava pod atmosferskim pritiscima i temperaturama što je i razlog njene nedostupnosti biljkama. Prema rezultatima višestruke regresione analize, u profilima zemljišta **P<sub>1</sub>-P<sub>4</sub>**, higroskopska vlaga igra ulogu u raspodeli cezijuma. Ovo se može objasniti razlikom između sadržaja gline koji je predstavljen ukupnim

procentom zemljišnih čestica manjim od 0,002 mm i samog mineraloškog sastava gline. Karakteristika većine minerala gline je negativni naboj kojim oni privlače molekule vode stvarajući tanke (približno monomolekulske) slojeve vode na svojoj površini (higroskopska vlaga) što je slično njihovoj sposobnosti da privlače  $^{137}\text{Cs}^+$  jone i adsorbuju ih na svojoj površini ili ih uključuju u strukturu svoje kristalne rešetke. Prema tome, povezanost cezijuma sa varijacijama sadržaja higroskopske vlage najverovatnije indirektno predstavlja njegovu povezanost sa mineralima gline prisutnim u zemljištu koji opisuju ponašanje cezijuma bolje nego ukupni sadržaj gline [17].

**Tabela 2. Rezultati višestruke linearne regresije između izabranih osobina zemljišta, sadržaja minerala gline i specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $R^2$  - koeficijent determinacije; nivo značajnosti 95% sa greškom \* $p \leq 0,0001$ , \*\* $p \leq 0,01$ )**

Aktivnost ( $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Humus (%)	Glina (%)	Higroskopska vlaga (%)	Konstanta	$R^2$ (%)
<i>0 - 80 cm (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>)</i>					
$^{137}\text{Cs}$	23,3	-1,8	11,6	21,4	81*
<i>0 - 80 cm (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>)</i>					
	Humus (%)	Ilit+Smektit (%)	Vermikulit (%)	Konstanta	$R^2$ (%)
$^{137}\text{Cs}$	26,1	-0,53	1,6	17,5	80**

### 3.4. Uticaj mineralnog sastava glinovite frakcije na distribuciju $^{137}\text{Cs}$

Da bi se ispitala prethodna pretpostavka, analizirano je da li mineralni sastav frakcije gline ima uticaja na koncentracije aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu. Rezultati određivanja mineralnog sastava glinovite frakcije zemljišta istog *antrosola* preuzeti su iz literature [18]. U profilima **P<sub>1</sub>-P<sub>3</sub>** glinovita frakcija zemljišta sastojala se od minerala ilita, smektita, vermikulita, MSS (mešoviti silikatni minerala), hlorita, kaolinata, kvarca i feldsapara dok su profili **P<sub>2</sub>** i **P<sub>3</sub>** sadržali i mineral kalcit. Pri tome, sadržaj ilita predstavljao je 41-52% ukupnog sadržaja minerala. Rezultati višestruke linearne regresije potvrdili su ( $p < 0,003$ ) da raspodela sadržaja dominantnih minerala ilita, smektita i vermikulita nađenih u zemljištu zajedno sa sadržajem humusa najbolje opisuju raspodelu  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom zemljišta (tabela 2).

Hemijska analogija cezijuma sa kalijumom može objasniti ovakav rezultat. Među mineralima gline, oni sa većim sadržajem kalijuma su minerali grade rešetke 2:1 (kao što su ilit, smektit, vermikulit) koji se odlikuju posebnom sposobnošću da adsorbuju i desorbuju kalijum, tj. da vrše razmenu katjona [20]. Usvajanjem kalijuma biljke smanjuju njegovu koncentraciju neposredno u zoni rizosfere što dovodi do proširenja prostora između kristalnih slojeva minerala u kojima su

fiksirani kalijumovi joni i do odavanja kalijuma čime se oslobađaju mesta adsorpcije koja zauzimaju drugi prisutni katjoni kao što je  $^{137}\text{Cs}^+$ . Pri tome, rezultati naše analize bili su u skladu sa razlikama kapaciteta izmene katjona koji opada upravo u nizu organska materija < vermikulit < ilit  $\approx$  smektit [20].

### 3.5. Korelacija $^{137}\text{Cs}$ i pristupačnih mikroelemenata

Teški metali bitni u ishrani biljaka kao što su cink, bakar, mangan i gvožđe su najvažniji mikroelementi potrebni u vrlo malim količinama za pravilan rast biljaka. U istraživanju zemljišta pod zasadam breskvi određeni su i pristupačni sadržaji ovih mikroelemenata, a njihove vrednosti dobijene su ekstrakcijom sa rastvorom 0,005 M DTPA. Pristupačni sadržaji Fe, Mn, Cu i Zn su se u zemljištu nalazili u intervalu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ): 5,8-41,6; 9,2-34,2; 1,0-7,6 i 0,2-1,3, respektivno [19]. Uočeno je tada da su obrasci distribucije po dubini profila pristupačnih oblika Fe i Mn bili više konstantni, manjeg koeficijenta varijacije (17% i 28%, respektivno) u odnosu ne pristupačne oblike Cu i Zn čije su varijacije bile približno 60% i koje su se mogle uporediti sa varijacijama  $^{137}\text{Cs}$  koje su ukupno iznosile  $\sim 80\%$ .

Rezultati proste linearne regresione analize su pokazali da je najverovatnije uzajamni afinitet prema organskoj materiji (humusu) zemljišta uticao na takvu njihovu distribuciju. Sadržaj humusa bio je u jakoj korelaciji sa dostupnim Zn ( $p < 0,001$ ) i u slabijoj, ali značajnoj korelaciji sa dostupnim Cu ( $p < 0,05$ ) i specifičnom aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $p < 0,05$ ) [19]. Organska materija opisala je veći procenat varijacija dostupnog Zn sa dubinom (56%) u poređenju sa varijacijama dostupnog Cu i radioaktivnog Cs (25%). Sadržaji pristupačnih mikroelemenata Fe i Mn, pokazali su da imaju drugačiju, više uniformnu distribuciju po dubini ispitivanih profila zemljišta koja nije mogla biti opisana varijacijama humusa.

Poznato je da organska materija ima značajan kapacitet adsorpcije elemenata u tragovima, a u zavisnosti od rastvorljivosti organskog liganda ona može igrati dvostruku ulogu: može da ih imobilise formirajući sa njima nerastvorljive komplekse dok, sa druge strane, prisustvo rastvorljivih organskih materija može da dovede do stvaranja jakih kompleksa koji povećavaju rastvorljivost i pokretljivost elemenata u tragovima [21]. Pretpostavljeno je da je u sloju *antrosola* dubine 0-80 cm, organska materija najverovatnije imala dvojaki uticaj na ispitivane elemente u tragovima: sa jedne strane povećavala je pristupačnost Cu i Zn u zemljištu, a sa druge ograničavala pokretljivost radioaktivnog cezijuma [19].

## 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je pregled prvih rezultata merenja specifične aktivnosti radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  černobiljskog porekla i njegove raspodele sa dubinom kultivisanog zemljišta tipa *antrosol*, 15 godina starog voćnjaka pod zasadam breskvi. Specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  su se kretale od  $1,8 \text{ Bqkg}^{-1}$  do  $35,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ , bitno su varirale sa povećanjem dubine zemljišta i dostigle ukupni koeficijent varijacije od 83%. Dugogodišnja kultivacija (obrađivanje) zemljišta bitno je uticala na distribuciju  $^{137}\text{Cs}$  s obzirom da je mehanička manipulacija zemljišta prenosila izotop cezijuma u dublje slojeve zemljišta (40-60 cm). Linearna korelacija između antropogenog  $^{137}\text{Cs}$  i prirodnog  $^{40}\text{K}$  (detektovanog u intervalu  $565 \text{ Bqkg}^{-1}$ -755

Bqkg<sup>-1</sup>) nije mogla biti uspostavljena s obzirom na značajne razlike u njihovom poreklu u zemljištu. Rezultati višestruke linearne regresione analize pokazali su da je distribucija <sup>137</sup>Cs u zemljištu povezana sa sadržajem humusa, gline i higroskopske vlage. Veza sa higroskopskom vlagom bila je objašnjena indirektnom povezanošću izotopa cezijuma sa mineralnim sastavom gline u zemljištu i potvrđena kada su registrovani minerali ilita, smektita i vermikulita (zbirno u opsegu 72-86%) čije prisustvo u zemljištu karakteriše intenzivna sorpcija i fiksacija cezijuma. Sa druge strane sadržaji pristupačnih mikroelemenata Fe, Mn, Cu i Zn nalazili su se u opsegu (mgkg<sup>-1</sup>): 5,8-41,6; 9,2-34,2; 1,0-7,6, odnosno 0,2-1,3. Uočeno je da su obrasci distribucije po dubini profila radionuklida <sup>137</sup>Cs i pristupačnih oblika Cu i Zn bili veoma slični, a rezultati analize su pokazali da je uzajamni afinitet pomenutih elemenata prema organskoj materiji zemljišta mogao da utiče na takvu njihovu distribuciju.

### Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije pod projektom: III43007.

## 5. LITERATURA

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, Vol. 1. Annex J Exposures and effects of the Chernobyl accident (NY: UNSCEAR) 2000.
- [2] IAEA. Applicability of Monitored Natural Attenuation at Radioactively Contaminated Sites. Technical Reports Series No. 445, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2006)
- [3] C. Tamponnet, A. Martin-Garin, M.-A. Gonze, N. Parekh, R. Vallejo, T. Sauras-Yera, J. Casadesus, C. Plassard, S. Staunton, M. Nordern, R. Avila and G. Shaw. An overview of BORIS: Bioavailability of Radionuclides in Soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 99(5) (2008) 820-830.
- [4] M. Hrachowitz, F.J. Maringer and M.H. Gerzabek. Soil redistribution model for undisturbed and cultivated sites based on chernobyl-derived Cesium-137 fallout. *J. Environ. Qual.* 34(4) (2005) 1302-1310.
- [5] M. Du, H. Yang, Q. Chang, K. Minami and T. Hatta. Caesium-137 fallout depth distribution in different soil profiles and significance for estimating soil erosion rate. *Soil. Sci.* 3(1) (1998) 23-33.
- [6] N.A. Beresford. Land contaminated by radioactive materials. *Soil Use and Management* 21 (2006) 468-474.
- [7] R. Fujiyoshi and S. Sawamura. Mesoscale variability of vertical profiles of environmental radionuclides (40K, 226Ra, 210Pb and 137Cs) in temperate forest soils in Germany. *Sci. Total Envir.* 320 (2004) 177-188.
- [8] I. Shcheglov, O.B. Tsvetnova and A.L. Klyashtorin. Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems: by the materials of a multilayer study in the areas severely contaminated due to the Chernobyl incident. Publisher: Nauka, Moscow, (2001)
- [9] S. Golmakani, M.M. Vahabi and H. Tahereh. Factors affecting the transfer of radionuclides from the environment to plants. *Radiat. Prot. Dosim.* 130 (2008) 368-375.
- [10] N. Kruyts and B. Delvaux. Soil organic horizons as a major source for radiocesium biorecycling in forest ecosystems. *J. Environ. Radioactiv.* 58 (2002) 175-179.

- [11] M. Larsson. The influence of soil properties on the transfer of  $^{137}\text{Cs}$  from soil to plant: results from a field study 21 years after the Chernobyl accident. MSc Thesis, Swedish University of Agricultural Science, (2008)
- [12] H. Tsukada, A. Takeda, S.I. Hisamatsu, J. Inaba. Concentration and specific activity of fallout  $^{137}\text{Cs}$  in extracted and particle-size fractions of cultivated soils. *Journal of environmental radioactivity*. 99(6) (2008) 875-81.
- [13] D. Popović, D. Todorović, V.S. Jokić, J. Nikolić, J. Ajtić. Contents of radionuclides in soils in Serbia: Dose calculations and environmental risk assessment. *Advances in Environmental Research* 6 (2009) 91-134.
- [14] S.D. Dragovic, B. Gajic, R.M. Dragovic, Lj. Jankovic-Mandic, L. Slavkovic- Beskoski, N.L. Mihailovic, M. Momcilovic, M. Cujic. Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia. *J. Environ. Monit.* 14 (2012) 127-137.
- [15] IUSS WORKING GROUP WRB. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 103. Rome: FAO, (2006)
- [16] I. Vukašinović, A. Đorđević, M.B. Rajković, D. Todorović and V.B.Pavlović. Distribution of natural radionuclides in anthrosol-type soil. *Turk. J. Agric. For.* 34(6) (2010) 539-546.
- [17] I. Vukašinović, D. Todorović, A. Đorđević, M.B. Rajković and V.B. Pavlović. Depth Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in anthrosol from the experimental field "Radmilovac" near Belgrade, Serbia. *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 64(3) (2013) 425-430.
- [18] Z.P. Tomić, A.R. Đorđević, M.B. Rajković, I. Vukašinović, N.S. Nikolić, N.S., V.B. Pavlović, C.M. Lačnjevac. Impact of Mineral Composition on the Distribution of Natural Radionuclides in Rigosol-Anthrosol. *Sensors and Transducers* 125 (2011) 115-130.
- [19] I.Ž. Vukašinović, D.J. Todorović, A.R. Đorđević, M.B. Rajković and V.B. Pavlović. Depth Distribution of Available Micronutrients in Cultivated Soil. *J. Agric. Sci.* 60(2) (2015) 177-187.
- [20] R. Kastori, Ž. Ilin, I. Maksimović, M. Putnik-Delić. Kalijum u ishrani biljaka. Poljoprivredni fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, (2013)
- [21] B.J. Alloway, B.J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. In: Alloway, B.J. (Ed.), Environmental pollution 22. Springer, Netherlands, (2013)

## DEPTH DISTRIBUTION OF $^{137}\text{Cs}$ IN CULTIVATED SOIL

Ivana Ž. VUKAŠINOVIĆ<sup>1</sup>, Miloš B. RAJKOVIĆ<sup>1</sup> and Dragana J. TODOROVIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Belgrade, Faculty of Agriculture, Belgrade-Zemun, Serbia

<sup>2</sup>Laboratory of Radiation and Environmental Protection, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia

Due to the fallout followed by Chernobyl accident in 1986 anthropogenic radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  was deposited in the soil. Given long half-life of  $^{137}\text{Cs}$  (30.05 years), cultivated soils in particular are subject of radiological protection because the question is whether this radionuclide would be retained in the surface layers of the soil, adopted by plants or transferred to the deeper soil layers. This paper presents an overview of the results of  $^{137}\text{Cs}$  specific activity measurements by gamma-spectrometry method in cultivated anthrosol soil of a 15-year old peach tree plantation at the experimental field "Radmilovac". Preparing the land for planting peach trees deep ploughing was conducted followed by 12-year-long cultivation, and soil sampling was carried out three years after the termination of all agricultural treatments. Overview of the analyzes of the long-term cultivation impact on  $^{137}\text{Cs}$  redistribution in the soil along the 0-80 cm profile depth is presented. Linear and multiple regression analysis was applied to assess to what extent the levels of cesium radioisotopes are associated with *a*) levels of potassium isotope  $^{40}\text{K}$  detected in the soil; *b*) the basic features that characterize the soil (pH, humus content, carbonate content, grain size distribution, moisture content of hygroscopic); *c*) mineral composition of the clay fraction of soil and *d*) available DTPA-extracted microelements Zn, Cu, Mn and Fe. Patterns of  $^{137}\text{Cs}$  distribution with depth indicated that radiocesium was mechanically transferred from the surface to the lower layers of soil during the cultivation. The results of the statistical analysis showed that on radiocesium variations with depth a major impact had the contents of humus and the main minerals of the clay fraction of soil – vermiculite, illite, and smectite.

CIP - Каталогизација у публикацији –  
Народна библиотека Србије, Београд

614.876(082)

621.311.25(477.41)(082)

504.5:539.16(497.11)(082)

ЧЕРНОБИЉ : 30 година после : монографија / уредник  
Гордана Пантелић. - Београд : Институт за нуклеарне науке  
"Винча", Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту  
животне средине "Заштита" : Друштво за заштиту од зрачења  
Србије и Црне Горе, 2016 (Београд : Институт за нуклеарне  
науке "Винча"). - 286 стр. : илустр. ; 25 cm

Тираж 150. - Библиографија уз сваки рад. - Summaries.

ISBN 978-86-7306-138-2 ("Винча")

1. Пантелић, Гордана [уредник]

а) Нуклеарна електрана "Чернобил" - Хаварија - Зборници

б) Животна средина - Загађење радиоактивним материјама

- Србија - Зборници с) Несреће у нуклеарним електранама

- Последице - Зборници д) Јонизујуће зрачење - Штетно

дејство - Србија - Зборници

COBISS.SR-ID 226685452