

## OSIROMAŠENI URANIJUM KAO PRODUKT NUKLEARNE TEHNOLOGIJE

Milan Orlić

Institut za nuklearne nauke "Vinča", pp.522, 11000 Beograd

Rad po pozivu

*Sadržaj - Osiromašeni uranijum (OU) korišćen je tokom rata u Jugoslaviji 1999. godine, isto kao i za vreme rata u Bosni i Gofskom zalivu, od strane NATO snaga. U Jugoslaviji se OU koristio na dva načina: u obliku municije, prvenstveno kalibra 30 mm, i kao sastavni deo nekih krstarećih raketa (kontrateg ili penetrator). Ukupna količina OU bačena na SRJ ceni se na oko 10 tona.*

*OU je nusprodukt nuklearne tehnologije i kao takav predstavlja niskoradioaktivni nuklearni otpad. Stoga se odlaže u posebna odlagališta. Međutim, zbog vojne primene našao se u životnoj sredini gde može da ispolji kako radiotoksičnost tako i hemotoksičnost. Na taj način dolazi do ugrožavanja ljudi i životne sredine.*

*U ovom radu dati su relevantni tehnološki parametri nastanka OU kao nus produkta nuklearne tehnologije, fizičke i hemijske osobine OU, dejstvo naoružanja sa OU, transport OU u životnoj sredini, kao i procena posledica po ljude i okolinu.*

*Prve ocene pokazuju da se radi o lokalnim efektima na mestima pogađanja. Kontaminirana su zemljišta do rastojanja od 100 m, ukupne površine oko 1000 m<sup>2</sup>. Akutnih posledica moglo je biti samo po ljude koji su se našli na mestu udara. Ukoliko su preživeli mehaničko dejstvo, osnovna opasnost im pretili od hemotoksičnosti rastvorljivih udahnutih aerosola. Na većim rastojanjima, reda stotinu metara, osnovna opasnost je radiotoksičnost nerastvorljivih aerosola. Ova opasnost nije akutna, ali se moraju pratiti naknadni efekti. Uticaj na životnu sredinu vezan je za mesto pogađanja. Najznačajniji efekat je interakcija nerastvorljivih formi uranijuma sa vodom u zemljištu.*

### 1. UVOD

Osiromašeni uranijum (OU) korišćen je tokom rata u Jugoslaviji 1999. godine od strane NATO snaga. Ceni se da je ukupna količina OU bačena na SRJ oko 10 t. Pre toga, za vreme rata u Gofskom zalivu bačeno je oko 320 t. OU je korišćen i u Bosni. U Jugoslaviji se OU koristio na dva načina: u obliku municije, prvenstveno kalibra 30 mm, i kao sastavni deo nekih krstarećih raketa (kontrateg ili penetrator).

OU je nusprodukt nuklearne tehnologije i kao takav predstavlja niskoradioaktivni nuklearni otpad. Stoga se odlaže u posebna odlagališta. Međutim, zbog vojne i, delimično civilne, primene našao se u životnoj sredini gde može da ispolji kako radiotoksičnost tako i hemotoksičnost. Na taj način dolazi do ugrožavanja ljudi i životne sredine.

Procena posledica delovanja OU u životnoj sredini i na ljude je kontraverzna. Sa jedne strane, predstavnici zvaničnih vojnih i državnih institucija zapadnih zemalja minimiziraju moguće štetne posledice, oslanjajući se na činjenicu da se uranijum već nalazi u prirodnoj sredini, a da je njegovo povećanje kao posledica korišćenja naoružanja sa OU malo i unutar geografskih varijacija. S druge strane, neformalne organizacije, kao što su udruženja američkih vojnih veterana ili ekološki pokreti, često izvlače previše stroge zaključke. Zbog toga je osnovni cilj ovog rada iznošenje i analiza stručnih informacija vezanih za OU, na osnovu kojih je moguće doneti kompetentne zaključke o mogućim posledicama.

O OU sve se više piše i kod nas i u svetu. Međutim, veoma malo se piše sa aspekta nuklearne tehnologije. U ovom radu obuhvaćen je i taj aspekt. Obradeno je dobijanje i skladištenje OU. Pored toga, date su relevantne fizičke i hemijske osobine uranijuma; prikazani su sadržaji prirodnog uranijuma u životnoj sredini i čoveku; date su granične vrednosti koncentracije uranijuma u vazduhu, vodi i hrani; detaljno je prikazana primena OU u civilne i posebno vojne svrhe; dejstvo naoružanja sa OU; karakteristike najvažnijih mernih metoda za utvrđivanje prisustva uranijuma u čoveku i životnoj sredini i, konačno, analizirane su moguće akutne i kasne posledice po ljude i životnu sredinu sa stanovišta radiotoksičnosti i hemotoksičnosti OU.

### 2. DOBIJANJE I SKLADIŠTENJE OU

U litosferi na 1 tonu zemljišta prosečno dolazi 0.5-5 g prirodnog urana, ređe i do 10 ppm. Na onim mestima gde ga ima više od 0.1% ekonomično je otvaranje rudnika uranijuma jer je on osnovno gorivo nuklearne energetike. Posle kopanja, ruda uranijuma (ili torijuma) se drobi, uklanja jalovina i sitni. Tako nastaje koncentrat prirodnog urana, najčešće u obliku triuranijum oksida (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Time započinje tzv. nuklearni gorivni ciklus (NGC).

Prirodni uranijum ima tri izotopa: <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U i <sup>238</sup>U. Njihov težinski udeo u prirodnom uranijumu je: 0.006%, 0.72% i 98.28%, respektivno. Za nuklearnu energetiku najznačajniji je <sup>235</sup>U. Međutim, njegova koncentracija u prirodnom uranijumu nije dovoljna. Da bi se uranijum koristio kao gorivo potrebno je sadržaj <sup>235</sup>U povećati sa 0.72% na preko 3 % u zavisnosti od tika reaktore. Stoga se uranijum oksid konvertuje u gas, uranijum heksafluorid (UF<sub>6</sub>) koji je pogodan za separaciju izotopa. Postoji nekoliko metoda separacije, od koji su za praksu najznačajnije gasna difuzija i gasno cetrifugiranje. Dobijaju se dve frakcije: osnovni

proizvod sa povećanim sadržajem  $^{235}\text{U}$  i nusprodukt obogaćivanja sa smanjenim sadržajem  $^{235}\text{U}$ , koji se naziva osiromašeni uranijum.

Posle obogaćivanja vrši se konverzija  $\text{UF}_6$  u uranijum dioksid ( $\text{UO}_2$ ), od kojeg se izrađuju gorivni elementi. Oni se koriste u nuklearnim reaktorima. U procesu sagorevanja, koncentracija izotopa  $^{235}\text{U}$  se smanjuje. Gorivo postaje neekonomično pa mora da se zamenjuje. Isluženo gorivo, preko postrojenja za preradu, ponovo može da dođe u postrojenje za obogaćivanje goriva, pri čemu jedan deo ostaje kao radioaktivni otpad. Time se gorivni ciklus zatvara.

Ovde se postavlja osnovno pitanje, koliko osiromašenog uranijuma nastaje u fazi obogaćivanja nuklearnog goriva i koliki je postotak  $^{235}\text{U}$  u njemu. Optimalni sastav osiromašenog uranijuma zavisi od cene rude uranijuma i cene obogaćivanja i konverzije u  $\text{UF}_6$ . Na osnovu proračuna može da se pokaže da taj optimalni sastav (postotak  $^{235}\text{U}$ ) može da varira u granicama 0.16 – 0.3 %. Standardna vrednost za sadržaj  $^{235}\text{U}$  u OU, koja se javlja u ugovorima koje korisnici nuklearnog goriva sklapaju sa zavodima za obogaćivanje, iznosi 0.2 %. Na osnovu ove vrednosti izvršice se sve dalje procene.

Polazeći od toga da za proizvodnju 1 MW dana toplotne energije treba 1.24 g  $^{235}\text{U}$  [1], uz koeficijent iskorišćenja od 70%, dobija se da je za lakovodne reaktore električne snage 1000 MW, potrebno godišnje 25 tona uranijuma sa obogaćenjem od 3.5 %. To zahteva kopanje oko 50 000 tona uranove rude od koje se dobija oko 200 tona koncentrata  $\text{U}_3\text{O}_8$ , koji se konvertuje u  $\text{UF}_6$ . U ovim uslovima od 1 t  $\text{UF}_6$  dobija se 130 kg obogaćenog  $\text{UF}_6$  i 870 kg osiromašenog  $\text{UF}_6$ . Dakle, nastaje oko 7 puta više osiromašenog nego uranijuma primenljivog u nuklearnoj energetici.

Samo u SAD do danas ima oko 800 000 t osiromašenog  $\text{UF}_6$ , pri čemu svake godine nastaje još dodatnih 30 000 t. Od toga oko 2/3 otpada na uranijum, 1/3 na fluor. Dakle, u SAD ima 500 000 "čistog" OU. U ostalim nuklearnim zemljama postoji bar još toliko. Konačno, proizilazi da danas u svetu ima preko milion tona OU.

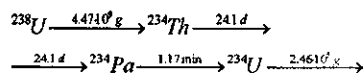
Osiromašeni uranijum se najčešće skladišti u obliku  $\text{UF}_6$  u metalne cilindre koji se obično nalaze u okviru postrojenja za obogaćivanje na otvorenom prostoru. Svaki cilindar sadrži po 12.7 t  $\text{UF}_6$ .

Na sobnoj temperaturi  $\text{UF}_6$  je u čvrstom stanju. Međutim, on sublimiše na temperaturi 56.4°C. U hemijskom pogledu vrlo je reaktivan. Sa vodom gradi izuzetno korozivnu fluorovodoničnu kiselinu i visoko toksični uranil fluorid. Cilindri su podložni koroziji pa se moraju neprekidno održavati. Pošto su na otvorenom, nisu isključeni ni akcidenti ili sabotaže. Tada bi došlo do ugrožavanja ljudi i životne sredine ne samo zbog pomenute toksičnosti uranil fluorida, već i zbog radio i hemotoksičnosti urana.

### 3. FIZIČKE I HEMIJSKE KARAKTERISTIKE (OSIROMAŠENOG) URANIJUMA

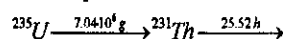
Sva tri uranova izotopa su radioaktivna, kao i njihovi produkti. Međutim, svi produkti raspada nisu od interesa. Onog trenutka kada se osiromašeni uranijum želi koristiti, od smeše izotopa hemijskim i metalurškim postupcima izdva-

se samo uranijum (sva tri izotopa). Taj proces se desio ovih godina. Zbog toga nije postignuta ravnoteža potomaka raspada. Prekid je nastao kod prvog potomka koji ima period poluživota znatno veći od desetak godina. U slučaju izotopa  $^{238}\text{U}$  značajni su sledeći radionuklidi



Iznad crte naznačen je period poluživota. Poslednji značajan izotop u nizu je  $^{234}\text{U}$  koji ulazi i u početni sastav osiromašenog urana. Iza njega sledi izotop  $^{230}\text{Th}$  sa periodom poluraspada od 75 400 godina. Stoga on, kao i sledeći izotopi u nizu nisu od interesa.

Niz izotopa  $^{235}\text{U}$  ima samo dva značajna člana



Sledeći potomak je  $^{231}\text{Pa}$  sa periodom poluraspada od 32800 godina, pa ni on ni njegovi potomci nisu značajni.

Vrsta raspada svakog značajnog radionuklida u osiromašenom uranijumu, kao i srednje emitovane energije po raspadu prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1. Srednje energije po raspadu izotopa prisutnih u OU

| Izotop  | Tip raspada | Srednja energija po raspadu, MeV |         |          |
|---------|-------------|----------------------------------|---------|----------|
|         |             | $\alpha$                         | $\beta$ | $\gamma$ |
| U-238   | $\alpha$    | 4,26                             | 0,01    | 0,001    |
| Th-234  | $\beta$     |                                  | 0,059   | 0,009    |
| Pa-234m | $\beta$     |                                  | 0,82    | 0,013    |
| Pa-234  | $\beta$     |                                  | 0,422   | 1,75     |
| U-234   | $\alpha$    | 4,84                             | 0,013   | 0,002    |
| U-235   | $\alpha$    | 4,47                             | 0,048   | 0,154    |
| Th-231  | $\beta$     |                                  | 0,163   | 0,026    |

Aktivnost pojedinih radioizotopa u osiromašenom uranu prikazana je u tabeli 2.

Tabela 2. Ukupna aktivnost OU kao i aktivnost prisutnih izotopa

| Izotop  | Težinski udeo, % | Aktivnost Bq/mg |
|---------|------------------|-----------------|
| U-238   | 99,8             | 12,27           |
| U-234   | 0,2              | 0,16            |
| U-235   | 0,001            | 2,29            |
| Th-231  | Tragovi          | 12,27           |
| Th-234  | Tragovi          | 12,27           |
| Pa-234  | Tragovi          | 0,16            |
| Ukupno: |                  | 39,42           |

Aktivnost čistog uranijuma-238 je 12.3 Bq/mg, a osiromašenog preko tri puta veća zbog prisustva njegovih potomaka, uranijuma-235 sa prvim potomkom i uranijuma-234. Aktivnost OU u odnosu na prirodni uranijum je niža.

Energija alfa čestica koje emituju izotopi prisutni u OU iznosi samo oko 10% energije alfa čestica u prirodnom uranijumu. Zahvaljujući protaktinijumu, OU emituje čak 40% energije beta čestica u odnosu na prirodni uran. Kod gama zračenja taj iznos je samo oko 1.5%. Od ovoga bitno zavisi i način prospekcije terena.

U hemijskom pogledu uranijum i OU se ponašaju jednako pa sve što je poznato za uranijum može da se primeni i u slučaju OU.

Uranijum se javlja u različitim valentnim stanjima od +2 do +6, a najčešće u heksavalentnoj formi, pa se u prirodi uglavnom nalazi u obliku uranil jona ( $UO_2^{2+}$ ).

Metalni uranijum je poznat kao jako redukciono sredstvo pa burno reaguje sa nemetalima. Na sobnoj temperaturi oksidiše lagano. Tada mu se boja menja od početne, zlatno žute do konačne crne u toku mesec dana. Pri sagorevanju uranijuma nastaju oksidi  $UO_2$ ,  $UO_3$  i  $U_2O_3$ . Prva dva su lako rastvorljiva u vodi i telesnim tečnostima, dok je treći malo rastvorljiv. Za masivne komade metalnog urana, kakvi se koriste u municiji, brzina oksidacije je mala. Na temperaturi od 175 °C ona iznosi 0.005 mm/dan. Na sobnoj temperaturi je znatno manja. Smanjenje brzine oksidacije postiže se dodavanjem drugih elemenata. Na primer, dodatkom 0.75% titana, koji je nađen u ostacima municije sa OU [2], smanjuje se za oko 16 puta.

Na osnovu ovoga proizilazi da će male čestice uranijuma oksidisati vrlo brzo, nasuprot velikim komadima metalnog uranijuma. Ukoliko se uranijum javi u formi aerosola, što je redovno pri dejstvovanju municije sa OU, doći će do spontanog sagorevanja već na temperaturama od 600-700 °C.

#### 4. URANIJUM U ŽIVOTNOJ SREDINI REGULATIVA

Kao prirodni element uranijum se nalazi u životnoj sredini, a time i u živim bićima. Sva tri njegova izotopa su radioaktivna što daje značajan doprinos u prirodnom nivou ozračenosti (prirodnom fonu). Ukupno godišnja efektivna doza kao posledica prirodnog zračenja iznosi oko 2-2.5 mSv. Od toga na  $^{238}U$  i njegove potonke otpada preko 1 mSv. Od ove vrednosti 90 % se odnosi na unutrašnje, a 10 % na spoljašnje izlaganje.

U tabeli 3. dat je sadržaj i aktivnost uranijuma u pojedinim elementima životne sredine i u čoveku.

Namerno rasipanje OU u životnu sredinu doprineće povećanju postojećih vrednosti sadržaja uranijuma u prirodi. Svaka realna ocena dodatne opasnosti po ljude i životnu sredinu, mora početi od poznatog stanja i utvrditi povećanje usled primene OU. Isto tako, vrednosti navedene u tabeli 3 ukazuju na potrebnu osetljivost mernih metoda kojima se utvrđuje prisustvo ili sadržaj OU u različitim uzorcima.

Štetno delovanje uranijuma u organizmu čoveka zbog radiotoksičnosti i hemotoksičnosti neprekidno se izučava. To je rezultiralo definisanjem graničnih vrednosti sadržaja uranijuma u različitim uzorcima. U tabeli 4 dat je pregled aktuelnih graničnih vrednosti vezanih za hemotoksičnost.

Tabela 3. Sadržaj  $^{238}U$  u životnoj sredini i čoveku

| Mesto                      | Sadržaj                              | Aktivnost              |
|----------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Prosečno zemljište         | 05-5 ppm                             | 7-60 Bq/kg             |
| Rudnici urana              |                                      | 100-5000 Bq/kg         |
| Fosfatne stene             |                                      | 100-4800 Bq/kg         |
| Vazduh                     | 0.02-0.076 ng/m <sup>3</sup>         | 1.2 μBq/m <sup>3</sup> |
| Voda za piće               | 0.1-8 μg/l                           | 1-90 mBq/l             |
| Podzemne vode              |                                      | <1-140 mBq/l           |
| Podzemne vode u SRJ        | 0.04-4 μg/l                          | 0.5-510 mBq/l          |
| More                       | 3.3 μg/l                             | 40 mBq/l               |
| Vazduh                     | 8x10 <sup>-5</sup> μg/m <sup>3</sup> | 1 μBq/m <sup>3</sup>   |
| Inhalacija urana           | 1 ng/dan                             |                        |
| Ingestija uranijuma vodom  | 0.8-2.1 ng/dan                       |                        |
| Ingestija uranijuma hranom | 1.5-3 μg/dan                         |                        |
| Kosti ljudi                | 0.02 μg/g pepela                     |                        |
| Pluća ljudi                | 1 ng/g suvog tkiva                   |                        |
| Urin                       | 0.05-0.5 μg/dan                      |                        |
| Feces                      | 1.4-1.8 μg/dan                       |                        |

Tabela 4 Granične vrednosti za unošenje uranijuma u pogledu hemotoksičnosti

| Medijum                    | Granična vrednost  | Ref             |
|----------------------------|--|-----------------|
| Voda za piće               | 2 μg/l<br>20 μg/l  | WHO 1998<br>EPA |
| Tolerantno oralno unošenje | 0.6 μg/kg telesne težine   | WHO 1998        |
| Vazduh                     | 0.2 mg/m <sup>3</sup> za nerastvorljiv uranijum<br>0.015 mg/m <sup>3</sup> za rastvorljiv uranijum | [3]             |
| Vazduh                     | 0.2 mg/m <sup>3</sup> za nerastvorljiv uranijum<br>0.05 mg/m <sup>3</sup> za rastvorljiv uranijum  | [4]             |

U svetu i našoj zemlji postoji regulativa kojom su definisane dozvoljene koncentracije rastvorljivih i nerastvorljivih uranijumovih jedinjenja i uranijuma u vazduhu. Prema našim propisima [3], za rastvorljiva jedinjenja uranijuma maksimalno dozvoljena koncentracija (MDK) profesionalno izloženih je 0.2 mg/m<sup>3</sup>, a za rastvorljiva 0.015 mg/m<sup>3</sup>. Prema američkim standardima [4], za profesionalno osoblje dozvoljene koncentracije uranijuma u vazduhu su 0.2

mg/m<sup>3</sup> za nerastvorljiva jedinjenja i 0.05 mg/m<sup>3</sup> za rastvorljiva jedinjenja. Za stanovništvo ove vrednosti su nešto niže. Koncentracije momentalno opasne po život i zdravlje (IDLH) prema NIOSH propisima [5], za rastvorljiva i nerastvorljiva jedinjenja, imaju granicu od 10 mg/m<sup>3</sup>.

Dozvoljene koncentracije uranijuma u vazduhu u pogledu radiotoksičnosti znatno su više. Za profesionalce one se vezuju za efektivnu dozu od 1 mSv (odgovara dozvoljenoj godišnjoj vrednosti za stanovništvo [9]). Ovoliku dozu u organizmu stvara 10 mg OU unetog inhalacijom, ili 1.5 g unetog ingestijom. To znači da ako bi neko ceo dan inhalirao kontaminirani vazduh i uneo 20 m<sup>3</sup> vazduha, za njega je dozvoljena koncentracija 0.5 mg/m<sup>3</sup>. Pošto su osobe koje su eventualno bile izložene takvoj inhalaciji boravile u prisustvu OU znatno kraće vreme, ova dozvoljena koncentracije se dodatno povećava. U svakom slučaju ona je znatno veća od odgovarajuće vrednosti za hemotoksičnost.

## 5. KORIŠĆENJE OU

Osiromašeni uranijum je našao određenu civilni i vojnu primenu. Najznačajnija civilna primena je u zaštiti od zračenja. To je posledica njegove velike gustine 19.07 g/cm<sup>3</sup> i velikog rednog broja (92).

Sve češće se u savremenim postrojenjima za separaciju izotopa koristi za dodatno dobijanje <sup>235</sup>U, tako da u OU njegov sadržaj bude znatno manji od 0.2%. Primenjuje se za izradu kobilica na jahtama, kontrategova na avionima, u grnčarstvu i kao katalizator u hemijskim procesima.

Najznačajnija primena OU očekuje se u reaktorima – briderima za konverziju <sup>238</sup>U u <sup>239</sup>Pu čime će se rešiti pitanje goriva za nuklearne reaktore u budućnosti.

Na žalost, osiromašeni uranijum našao je i vojnu primenu za izradu municije različitog kalibra, kao i u pojedinim komponentama raketa.

Municija na bazi osiromašenog uranijuma namenjena je za gađanje protivturičkih tenkova i skloništa. Realizuje se u više različitih kalibara. Bitan deo ove municije je penetrator napravljena od legure u kojoj je dominantno prisustvo osiromašenog uranijuma (legiranjem uranijuma sa npr. 2% molibdena i 0.75% titana uz specijalnu temperaturnu obradu, dobija se metal izuzetne tvrdoće [1]). U tabeli 5. navedena je masa osiromašenog uranijuma za pojedine kalibre oružja.

Tabela 5. Poznati kalibri municije na bazi OU

| Kalibar, mm | Tip                    | Masa OU, g |
|-------------|------------------------|------------|
| 7,62        |                        |            |
| 20          | MK149                  | 70         |
| 25          | PGU-20                 | 148        |
| 25          | M919                   | 97         |
| 30          | PGU-14                 | 298        |
| 105         | M774                   | 3364       |
| 105         | M833                   | 3668       |
| 120         |                        |            |
| 155         | Specijalna artiljerija |            |

Do sada je najčešća bila primena municije kalibra 30 mm (prikazana na sl.1), koja se ispaljuje iz topova sa aviona A-10, ili iz tenkova. Namena ove municije proizilazi iz njene velike probojne moći. Pomenutim kalibrom 30 mm probija se čelik debljine do 6 cm.

Ova municija korišćena je u ratu u Gofskom zalivu, u Bosni [2,6-8] i sada u Jugoslaviji (Kosovo) [11-13]. Najviše podataka o količini ispaljene municije ima iz Gofskog rata. Tamo je ispaljeno više od 940 000 metaka kalibra 30 mm i oko 14 000 municije kalibra 105 i 120 mm, što prema podacima iz tabele 3. čini oko 320 tona. U literaturi se ovi podaci kreću u granicama 300 - 800 tona. U Bosni je korišćen uglavnom kalibar 30 mm i ceni se da je ispaljeno na hiljade ili desetine hiljada metaka.



Sl.1 Izgled municije kalibra 30 mm na bazi OU.

Preciznih podataka o količini ispaljene ovakve municije u Jugoslaviji za sada nema. To može da da samo NATO. Prema raspoloživim podacima korišćena je isključivo municija kalibra 30 mm u kojoj se nalazi 298 g OU i to oko 3000 komada, što čini oko 1 tonu osiromašenog urana. Sreće se i cifra od 10 000 upotrebljenih komada ovih metaka, što daje oko 3 tone OU.

Od krstarećih raketa zahteva se velika preciznost pogadjanja. Da bi se to postiglo potrebno je da balistika leta bude precizna. Pokazalo se da je to nemoguće postići bez korišćenja elemenata ovih raketa sa vrlo velikom gustinom (poznato je da se u prvih 550 aviona Boeing 747 nalazilo po 1500 kg OU). Osiromašeni uranijum to najbolje zadovoljava. Osim toga ima ga dovoljno i jeftin je. Nije isključeno ni da se u ovim raketama OU koristi kao penetrator za probojno dejstvo. Ceni se da se u proseku koristi oko 20 kg osiromašenog uranijuma po jednoj krstarećoj raketi. Na našu zemlju ispaljeno je oko 400 krstarećih raketa za koje se može smatrati da su sadržale osiromašeni uranijum. To znači da je po ovom osnovu u našu životnu sredinu palo još 8 tona osiromašenog uranijuma. Sa još 1-3 tone iz municije kalibra 30 mm, to čini 9-11 tona osiromašenog uranijuma. Ovoj količini OU odgovara aktivnost od 350-430 GBq (9,4-11,6 Ci).

Uzimajući u obzir sve zvanične informacije o količini OU bačenog na SRJ, uvek se dobija cifra od oko 10 t. Kao nepoznanica ostaje da li je sva ta količina vezana samo za

municiju na bazi OU, ili značajan deo otpada na krstareće rakete u kojima su neki sastavni delovi izrađeni od OU.

#### 6. DEJSTVO NAORUŽANJA NA BAZI OU

Od značaja je poznavati dejstvo dve vrste naoružanja sa OU: municije različitog kalibra i krstarećih raketa. Pored čisto mehaničkog dejstva, zbog prisustva izotopa uranijuma i njihovih potomaka, u oba slučaja može se javiti hemotoksično i radiotoksično dejstvo na ljude, kao i uticaj na životnu sredinu. Za procenu ovog dejstva bitno je uočiti šta se dešava sa penetratorom u trenutku udara o čvrstu metu kakva je tenk ili namensko sklonište.

U slučaju municije na bazi OU, posle pogađanja čvrste mete mogu nastati sledeći oblici OU:

- Celi penetratori ili njegovi veliki delovi (desetine grama)
- Parčad penetratora (grami)
- Krupni aerosoli (prečnika preko 10 μm) i
- Aerosoli nastali sagorevanjem dela udarne igle.

Prve dve vrste čestica, sačinjene od metalnog uranijuma (sa dodacima plemenitih metala), su teške i padaju u neposrednoj okolini udara (do deset metara). Ove čestice mogu intenzivno reagovati sa tečnostima u okolini u hemijskom pogledu.

I treća vrsta čestica, krupni aerosoli, odseda u okolini mesta udara. Do rastojanja od oko sto metara u pravcu vetra pada najveći broj ovih čestica. U bočnim pravcima ova rastojanja su nekoliko desetina metara. Ove čestice su hemijski aktivne sa okolinom.

Poslednja vrsta čestica javlja se u slučaju čeonog pogotka mete. Tada se na mestu udara javljaju visoke temperature – oko 1200 °C, što je više od temperature na kojoj gori uranijum u prahu. Deo penetratora od OU, dakle, gori pa nastaju  $UO_2$ ,  $UO_3$  i  $U_3O_8$ . U literaturi se navode različiti podaci o delu penetratora koji sagori. On se kreće od 5% do 70%.

Zbog naglog hlađenja dolazi do procesa formiranja aerosola. Ovde su bitna dva procesa: kondenzacija i koagulacija. Korespondentne sile su površinskog i zapreminskog karaktera. Zbog toga se distribucija prečnika aerosola pokorava logaritamsko-normalnoj raspodeli. Najveći broj ovih čestica ima prečnik ispod 2.5 μm. Proces hlađenja je takvog karaktera da površina ovih aerosola poprima keramičku formu. Dakle, nastaju tzv. keramički aerosoli koji imaju malu rastvorljivost u vodi i telesnim tečnostima. Od ovoga bitno zavisi mehanizam delovanja ovih aerosola na živi svet.

Za municiju kalibra 30 mm po jednom pogotku u tvrdu metu, u najgorem slučaju u aerosole može da pređe oko 200 g uranijuma-238. Verovatno je ova cifra znatno niža. Kako se ova municija najviše koristi kao protivtenkovsko oružje, i kako je ekonomično gađanje tek nekoliko tenkova, može se uzeti da je po jednom ovakvom napadu bačeno oko 10 kg OU (konzervativni pristup). Ovo može da posluži kao prva ocena za "source term", na osnovu kojeg može da se modeluje transport aerosola kroz atmosferu.

Nastali aerosoli u zavisnosti od meteoroloških uslova procene se na velike udaljenosti, čak i do nekoliko desetina

kilometara, uz značajno razređenje i padanje na zemljište i akvatoriju. Posle stotinak metara njihova površinska aktivnost je mala i teško merljiva.

Mehanizam dejstva krstarećih raketa pri udaru nije sasvim poznat. U slučaju dubinskog dejstva sav OU ostaje zarobljen pod zemljom. Pri čeonim pogodcima dešava se slična situacija kao kod municije na bazi OU, odnosno mogu se javiti pomenute četiri vrste čestica.

#### 7. MERENJA VEZANA ZA OU

Merenja koncentracije ili aktivnosti OU mogu biti vezana za:

○ Prospekciju terena radi utvrđivanja lokacije na kojoj je došlo do primene naoružanja sa OU

○ Merenje sadržaja uranijuma u uzorcima zemljišta, hrane, vode, vazduha, biljaka i životinja

○ Merenje sadržaja uranijuma u telu i ekskretima čoveka radi procene mogućih efekata

Prospekcija terena vrši se radi brzog pronalazjenja lokacija na kojima je došlo do primene naoružanja sa OU. Ove metode su neizbežno vezane za merenja jonizujućeg zračenja. Merenja alfa zračenja nisu pogodna zbog malog dometa alfa čestica. Domet beta čestica, radioizotopa Pa-234m prisutnog u OU, maksimalne energije 2.28 MeV (srednje 0.82 MeV), iznosi nekoliko metara u vazduhu. Istog reda veličine je i domet gama zračenja koje dominantno potiče od U-238. Kako OU emituje znatno više beta čestica nego gama kvanata, za prospekciju terena najpogodniji su instrumenti osetljivi i na beta i na gama zračenje. To su npr. GM brojači sa tankim beta prozorom ili scintilacioni detektori sa tankom zaštitom od svetlosti. Prilikom merenja oni treba da su što bliže površini koja se ispituje ili zemljištu. Čak i u slučaju korišćenja takvih instrumenata nije jednostavno locirati mesto na kome se našao OU. Potrebno je prići gotovo na rastojanja manja od 1-2 m.

Posledice izlaganja stanovništva osiromašenom uranijumu mogu se utvrditi samo na osnovu efektivne doze. Da bi se ustanovile efektivne doze potrebno je odrediti unete količine osiromašenog uranijuma u telo čoveka i eventualno spoljašnje izlaganje. Ovo se može učiniti samo na osnovu merenja koncentracije uranijuma-238 na terenu, u vazduhu, vodi, hrani ili u telu čoveka. Slično važi i za utvrđivanje hemotoksičnosti UO.

Merenje sadržaja uranijuma u uzorcima zemljišta, hrane, vode, biljaka i životinja, kao i u ljudskim ekskretima vrše se na posebno pripremljenim uzorcima. Ova merenja se obavljaju isključivo u namenskim laboratorijama. Koriste se dve grupe metoda: nuklearne i nenuklearne. Od nuklearnih najznačajnije su: alfa spektrometrija, gama spektrometrija, spektrometrija X i niskoenergetskog gama zračenja, neutronska aktivaciona analiza i merenje aktivnosti celog tela. U nenuklearne metode spadaju: fluorimetrija, fosforometrija i masena apsorpciona spektrometrija. U tabeli 6. se daje pregled karakteristika najznačajnijih metoda.

Iz tabele se vidi da većina metoda nisu jednostavne i da su vrlo specifične. Ključno za sve metode je pravilno uzimanje i priprema uzoraka za merenje.

Priprema može biti vrlo jednostavna kao u slučaju gama spektrometrije ili znatno komplikovanija kao kod alfa spektrometrije. Verovatno je neutronska aktivaciona analiza najosetljivija metoda. Međutim, ona je i najskuplja jer zahteva primenu snažnih neutronske izvora kao što je reaktor.

Tabela 6. Karakteristike nekih mernih metoda [10]

| Metoda   | Osetljivost                              | Napomena                     |
|--|--|------------------------------|
| Gama spektrometrija  | Zavisí od vremena kolekcije              | Jednostavna priprema uzoraka |
| Spektrometrija X i niskoenergetskog gama zračenja  | Zavisí od vremena kolekcije              | Pažljiva priprema uzoraka    |
| Alfa spektrometrija  | 100 µg/ml<br>Zavisí od vremena kolekcije | Pažljiva priprema uzoraka    |
| Alfa radiometrija  | Zavisí od vremena kolekcije              | Pažljiva priprema uzoraka    |
| X florescentna analiza   | 3 µg                                     | Jednostavna priprema uzoraka |
| Brojač celog tela  | 5 Bq                                     | Nema                         |
| Atomska apsorpciona spektrometrija<br>-sa detektorom plamena<br>-sa grafitnim topljenjem | 30 µg/ml<br>0.09 µg/ml                   | Suvo spaljivanje             |
| Neutronska aktivaciona analiza pomoću gama spektrometrije                                | $2 \cdot 10^{-10}$ µg/ml                 | Jednostavna priprema uzoraka |

Merenje aktivnosti ili koncentracije aerosola osiromašenog uranijuma u vazduhu ne može da se obavi direktno. To se radi prosisavanjem većih količina vazduha kroz odgovarajuće filtere [14]. Dobijeni uzorak je emiter alfa, beta i gama zračenja, pa se može primeniti neka od raspoloživih metoda merenja

## 8. POSLEDICE PO LJUDE I ŽIVOTNU SREDINU

Štetno dejstvo osiromašenog uranijuma može biti izazvano radiotoksičnošću i hemotoksičnošću. Radiotoksičnost može imati uzrok u spoljašnjem ili unutrašnjem izlaganju. Koji će efekat biti dominantan zavisi od više faktora, kao što su način pogađanja mete, meteorološki uslovi i udaljenost od mesta pogađanja. Moguće je uočiti nekoliko tipičnih scenarija u kojima je dominantan neki od oih efekata.

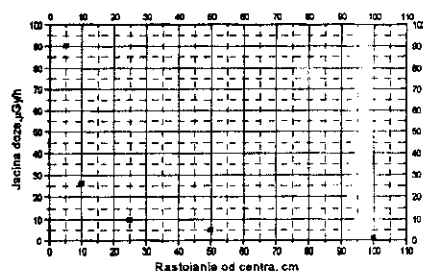
### Utícaj celih penetratora

Spoljašnje izlaganje značajno je pre svega u slučajevima kada se ceo penetrator ili njegov deo nađe u blizini ljudi.

Zavisnost jačine doze od rastojanja od udarne igle prikazana je na sl. 2. Kontaktna jačina doze iznosi oko 20 mGy/h. Na rastojanju od 50 cm od udarne igle izmerena je jačina doze od 5 µGy/h, što znači da bi trebalo 1000 h da bi se dobila ekvivalentna doza od 5 mSv (godišnja doza za stanovništvo) [1]. Ukoliko se penetrator nalazi neposredno u kontaktu sa kožom, zbog prisustva beta i alfa zračenja sa površine igle, jačina doze na koži se znatno povećava pa mogu da nastanu i promene na koži [1]. Ovakvi slučajevi su veoma retki i lako se mogu izbeći odgovarajućim pravilima ponašanja. Utícaj hemotoksičnosti je zanemarljiv u ovom slučaju.

### Osobe u pogodnom objektu

Osobe u pogodnom objektu najviše su izložene štetnom delovanju OU. Međutim, ove posledice su zanemarjive u odnosu na posledice mehaničkog delovanja



Sl.2 Zavisnost jačine doze gama zračenja od rastojanja od penetratora municije kalibra 30 mm.

### Osobe u neposrednoj blizini pogodnog objekta

Osnovnu opasnost predstavlja inhalacija aerosola u neposrednoj okolini pogodnog objekta. Tek precizno modelovanje pojave ili merenje može da pokaže koliko miligrama osiromašenog uranijuma je uneto u organizam. Najveću količinu OU u organizam unose vojnici i ljudi koji su se našli u neposrednoj okolini pogodnog mesta u trenutku udara. Nije isključeno da su u tim slučajevima inhalirali i stonine grama OU. Inhalirani aerosoli imaju i rastvorljivu i nerastvorljivu komponentu. Od rastvorljive komponente nisu isključene ni akutne posledice izazvane hemotoksičnošću urana. Ukupne ekvivalentne doze mogu iznositi i desetinu milisiverta. Dakle, posledice radiotoksičnosti su znatno manje od posledica hemotoksičnosti i mogu dovesti samo do blago povećanog rizika od kancera.

### Koncentracija aerosola u vazduhu oko mesta pogotka

Konačno, postavlja se pitanje kolike su moguće koncentracije OU u vazduhu u realnim situacijama? Realno je očekivati da je po jednom napadu na tenkove upotrebljena količina od 10 kg OU, a pri jednom pogađanju krstarećom raketom oko 40 kg. Neka 10 % sagori, a ostalo padne u okolinu mesta udara gde lokalno ugrožava životnu sredinu. Kolika je koncentracija OU u vazduhu? Neka je u početnom trenutku sagoreli OU ravnomerno raspoređen u zapremini  $10 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$ . Dobija se koncentracija od  $1-4 \text{ g/m}^3$ . Ove koncentracije su znatno veće od dozvoljenih. Međutim, ljudi koji bi se tu eventualno našli ne udišu taj vazduh ceo dan, već

maksimalno 10-tak minuta. Ukupno uneta količina OU bila bi tada 3-30 mg, što je znatno više od dozvoljenih vrednosti. Osobe koje bi se našle u takvoj situaciji bile bi ugrožene pre svega zbog hemotoksičnosti OU, mada ni radiotoksičnost nije zanemarljiva.

#### *Koncentracija aerosola u vazduhu u srednjoj zoni*

Druga situacija odnosi se na osobe koje bi se našle u sledećoj zoni koja obuhvata površinu od oko 1000 m<sup>2</sup> (100x10 m<sup>2</sup>). Neka je sav OU iz prethodnog računanja ravnomerno raspoređen iznad ove površine do visine od 10 m. Ukupna zapremina je 10000 m<sup>3</sup> pa su početne koncentracije OU deset puta manje: 0.1-0.4 g/m<sup>3</sup>. Za iste uslove boravka, unete količine OU bile bi 0.3-3 mg. Ove vrednosti nisu respektabilne u pogledu radiotoksičnosti. U pogledu hemotoksičnosti one su na nivou dozvoljenih vrednosti. S obzirom na konzervativan pristup u ovoj oceni, verovatno su dobijene vrednosti ispod dozvoljenih nivoa.

#### *Koncentracija aerosola u vazduhu u daljoj zoni*

Treća situacija odnosi se na oblast van površine od 1000 m<sup>2</sup>. U toj oblasti je, kao što prethodni primer pokazuje, i hemotoksičnost i radiotoksičnost znatno ispod dozvoljenih vrednosti.

#### *Saniranje pogodjenih objekata*

U kasnijim fazama posle udara, naročito pri saniranju posledica, nije isključena i dodatna inhalacija aerosola iz okoline mesta udara. Razlog je resuspenzija aerosola koji su pali na teren, a koju izazva vetar ili kretanje vozila. S obzirom da će veći deo aerosola ostati vezan u zemljištu, naročito ako je bilo kiše, ne očekuju se koncentracije OU u vazduhu kao u prethodnim slučajevima. To znači da efekti hemotoksičnosti i radiotoksičnosti neće biti izraženi. Ekvivalentne doze u ovim slučajevima ne mogu preći vrednosti od desetak mikrosiverta.

#### *Kretanje po kontaminiranom terenu*

Spoljašnje izlaganje ljudi koji bi se kretali po zemljištu kontaminiranim OU može se oceniti uz pretpostavku o maksimalnoj koncentraciji OU u zemljištu od 70 mg po kilogramu zemljišta. Neka je površina kontaminiranog zemljišta oko 1000 m<sup>2</sup>. Proračuni pokazuju da je jačina doze na 1 m iznad tla mala, oko 20 nGy/h, što je oko pet puta manje od prirodnog fona. Jačina doze van ovog prostora primarne kontaminacije još je manja.

#### *Promašena meta*

Ukoliko je meta promašena, mali procenat OU preći će u fazu nerastvorljivih aerosola. Metalni uranijum naći će se u zemljištu gde je moguća interakcija sa vodom. U zavisnosti od geološke situacije nije isključeno zagađenje čak i podzemnih voda. Ovo mora da se detaljno izučiti na svakoj lokaciji posebno. Ovaj scenario je najnepovoljniji sa stancvišta ugrožavanja životne sredine.

#### *Ingestija*

Opasnost za ljude kao posledica ingestije OU ima značaja samo u okolini mesta pogotka, gde se nalaze rastvorljive forme uranijuma ili njegovih oksida. Ukoliko su ova mesta otkrivena i ako je regulisan pristup njima, ova opasnost se svodi na minimum.

#### *Povređivanje*

Pri eventualnom povređivanju ljudi parčicama penetratora od OU, dolazi do direktnog hemotoksičnog i radiotoksičnog delovanja na organizam. Pošto se radi o rastvorljivom OU hemotoksičnost je dominantna. Ukoliko se ne preduzmu hirurške mere, efekti mogu biti značajni. Radiotoksičnost je lokalnog karaktera i znatno manja od hemotoksičnosti.

#### *Delovanje na rukovaoce sa OU*

Ovo pitanje od interese je samo za armije koje koriste ovu vrstu naoružanja. S obzirom na kompaktnost OU u svim vrstama naoružanja, hemijsko delovanje je isključeno. Radiološko delovanje se praktično svodi samo na spoljašnje izlaganje. Doze koje rukovaoci mogu da prime ne prelaze godišnje vrednosti za profesionalno osoblje. U odnosu na druge vrste rizika koji se sreću kod vojnika, ovaj rizik je prihvatljiv.

Sasvim druga situacija nastaje ako se ovi vojnici nađu na eventualno osvojenom terenu na kojem je primenjen OU. Tada za njih važe rizici koji su već opisani.

#### *Delovanje na stanovništvo*

Samo za stanovništvo koje se u trenutku udara nalazilo na rastojanjima do oko 100 m postoji mogućnost izlaganja zračenju uranijuma i njegovih potomaka. Doze su znatno manje od godišnjih doza koje stanovništvo normalno prima. Kao posledica toga može doći do povećanja rizika od oboljenja i eventualno smrti od kancera sa latentnim periodom od nekoliko desetina godina. Međutim ove verovatnoće su znatno manje od prirodnih vrednosti pa će biti praktično nemoguće utvrditi broj ovih pojava.

To ne znači da sve osobe koje su bile u blizini mesta udara ne treba da budu medicinski ispitane i praćene u narednom periodu.

## **9. ZAKLJUČAK**

Municija na bazi osiromašenog uranijuma korišćena je na teritoriji Jugoslavije. To je zvanično potvrdila VJ. Količina bačenog osiromašenog uranijuma tek treba da se utvrdi. To može da zna samo NATO. Procene pokazuju da je na našu teritoriju bačeno oko 10 tona OU.

Štetno dejstvo osiromašenog uranijuma može biti izazvano hemotoksičnošću i radiotoksičnošću OU. Radiotoksičnost može da potiče od spoljašnjeg ili unutrašnjeg izlaganja. Spoljašnje izlaganje je značajno samo od većih ostataka udarne igle, ili eventualno sa kontaminiranog terena. Unutrašnje izlaganje može biti posledica ingestije i inhalacije. Uticaj ingestije je znatno manji i može se lakše kontrolisati.

Osnovnu opasnost kod internog izlaganja predstavlja inhalacija aerosola u neposrednoj okolini pogođenog objekta. Najveću količinu OU u organizam unose vojnici i ljudi koji su se našli u neposrednoj okolini pogođenog mesta u trenutku udara. Nije isključeno da su u tim slučajevima inhalirali i stotine grama OU. Inhalirani aerosoli imaju i rastvorljivu i nerastvorljivu komponentu. Od rastvorljive komponente nisu isključene ni akutne posledice izazvane hemotoksičnošću urana. Ukupne ekvivalentne doze mogu iznositi i desetinu milisieverta. Dakle, posledice radiotoksičnosti su znatno manje od posledica hemotoksičnosti i mogu dovesti samo do blago povećanog rizika od kancera.

Ukoliko je meta promašena, mali postotak OU preći će u fazu nerastvorljivih aerosola. Metalni uranijum naći će se u zemljištu gde je moguća interakcija sa vodom. U zavisnosti od geološke situacije moguće je zagađenje i podzemnih voda. Ovo mora da se detaljno izuči na svakoj lokaciji posebno.

Ocene pokazuju da se radi o lokalnim efektima na mestima pogađanja. Kontaminirana su zemljišta do rastojanja od 100 m, ukupne površine oko 1000 m<sup>2</sup>. Akutnih posledica moglo je biti samo po ljude koji su se našli na mestu udara. Ukoliko su preživeli mehaničko dejstvo, osnovna opasnost im preti od hemotoksičnosti rastvorljivih udahnutih aerosola. Na većim rastojanjima, u pitanju su stotine metara, osnovna opasnost je radiotoksičnost nerastvorljivih aerosola.

## 10. LITERATURA

- [1] Rahn, F.J., Adamantiades, A.G., Kenton, J.E., Braun, C., A GUIDE TO NUCLEAR POWER TECHNOLOGY, J. Wiley and Sons, New York, 1984.
- [2] Ristić, D., Benderać, R., Vejnović, Z., Orlić, M., Pavlović, S., AMUNITION PRODUCED FROM DEPLETED URANIUM, YUNSC'96, Proc., Yugoslav Nuclear Societe Conference, Belgrade, 7-9 Oct 1996, pp.557-561.
- [3] MAKSIMALNO DOZVOLJENE KONCENTRACIJE GASOVA, PARA I AEROSOLA U ATMOSFERI RADNIH PROSTORIJA I RADILIŠTA, JUS Z.B0.001, 1991.
- [4] OSHA Regulation, Standard-29CFR, Limitfor air contaminant-1910.1000 Table 1, 1997.
- [5] NIOSH IMMEDIATELY DANGEROUS TO LIFE OR HEALTH CONCENTRATIONS (IDLHs), NIOSH CHEMICAL LISTING AND DOCUMENTATION OF REVISED IDLH VALUES (AS OF 3/1/95), Cincinnati, 1995.
- [6] D.Ristić, D.Benderać, Z.Vejnović, M.Orlić, S.Pavlović, MUNICIJA KORIŠĆENA OD STRANE NATO SNAGA U BOSNI IZRAĐENA OD OSIROMAŠENOG URANIJUMA, Bilten INN Vinča, br.4, 1997. p.205-212
- [7] M.Orlić, M.Baroš, B.Đurđić, R.Zagorac, M.Mitrović, D.Ristić, RADIOLOŠKA KONTAMINACIJA ŽIVOTNE SREDINE U RATNIM USLOVIMA, Ekologica, Br. 4, 1998.
- [8] M.Orlić, D.Fortuna., RADIOAKTIVNA KONTAMINACIJA ŽIVOTNE SREDINE U RATNIM USLOVIMA, Bilten ŠC ABHO. br.8, 1998. p 45-55.
- [9] INTERNATIONAL BASIC SAFETY STANDARDS FOR PROTECTION AGAINST IONIZING RADIATION AND FOR SAFETY OF RADIATION SOURCES, IAEA, Vienna, 1996.
- [10] I.Camins, J.H.Shinn, ANALYSYS OF BERILLIUM AND DEPLETED URANIUM: AN OWRVIEW OF DETECTION METHODS IN AEROSOLS AND SOILS, UCID-21400, LLNL, 1988.
- [11] M.Orlić, N.Miljević, Lj.Vuksanović, ZAGAĐENJE ŽIVOTNE SREDINE OSIROMAŠENIM URANOM U NAŠOJ ZEMLJI, Prvo kliničko savetovanje iz patologije i terapije životinja, Budva, 13-17 sept.1999, Zbornik radova, pp.136-140
- [12] M.Orlić, N.Miljević, POSLEDICE NATO BOMBARDOVANJA VEZANE ZA OSIROMAŠENI URAN, Dani zavoda 99. Beograd, okt.1999, Zbornik radova, pp.263-271
- [13] D.Vujasinović, M.Orlić, D.Glišović, Z.Dimić, SISTEM ZA KOLEKCIJU RADIO-AKTIVNOSTI VAZDUHA, XVII simpozijum Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja, Zbornik, str.203-206, Beograd, maj 1993.

*Abstract – Depleted uranium (DU) has been used during the War in Yugoslavia in the year 1999 by NATO forces, as well as in Bosnia and Gulf War. In Yugoslavia it has been used in two modalities: as ammunition (mostly caliber 30 mm) and as a part of cruise missiles (counterweight or penetrator). Total amount of DU in Yugoslavia was about 10 tons.*

*DU is by product of nuclear technology and represents low-level nuclear waste. Therefore it should be load. But, because of military application it is in the environment where it could react chemotoxic or radiotoxic and so endanger people and animals.*

*In this paper all relevant technological parameters of DU: grown, physical and chemical properties, DU ammunition effects, environmental DU transport, and estimation of consequences on people and environment have been presented.*

### DEPLETED URANIUM AS A BY PRODUCT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

Milan Orlić