

M.Vujović

REFERAT

Institut za nuklearne nauke

"Boris Kidrič" - Vinča

V.Vojvodić

VTI - Beograd

## JONIZACIONI PROFIL BETA ZRAČENJA RADIOAKTIVNOG OBLAKA

IONIZATION PROFILE OF BETA RADIATION FROM RADIOACTIVE  
CLOUD

SADRŽAJ - Dat je metod izračunavanja jonizacionog profila beta zračenja radioaktivnog oblaka. Metod je primenljiv kako za velike visine (H 75 km) tako i za manje visine gde se debljina oblaka mora uzimati u obzir. Krajnji rezultat je dat u analitičkoj formi.

ABSTRACT - A method for the calculation of the ionization profile induced by beta radiation from a radioactive cloud is given. The procedure can be applied for high altitudes of the cloud (H 75 km) as well as for lower ones, when the thickness of the cloud must be taken into account. The final result is given in the analytical form.

## 1. UVOD

Nuklearna eksplozija je snažan izvor jonizujućeg zračenja. Povećanje koncentracije naelektrisanih čestica (elektrona, pozitivnih i negativnih jona) kao i promena jonizacionog profila atmosfere odnosno jonosfere menja uslove prostiranja elektromagnetnih talasa što može, za određeno vreme, u oblasti zahvaćenoj jonizacionim dejstvom NE otežati ili sasvim onemogućiti komunikaciju na određenim talasnim dužinama. Da bi se izvršio proračun prostorno-vremenske zavisnosti koncentracije slobodnih elektrona (i jona) od snage i visine NE, potrebno je kvantitativno opisati brojne procese formiranja i nestanka slobodnih elektrona, i to u nehomogenoj sredini kakva je atmosfera, i za izvor koji je promenljiv u vremenu i po obliku i po lokaciji a i po intenzitetu i spektru zračenja.

U ovom radu biće razmatran efekat beta zračenja (elektrona) radioaktivnog oblaka koje, uz naknadno gama zračenje, predstavlja osnovni izvor dugotrajnih i širokorasprostranjenih poremećaja atmosfere odnosno jonosfere. U literaturi koja je posvećena ovoj

problematici tretiran je samo slučaj oblaka na velikim visinama ( $> 90$  km) a krajnji rezultat, kriva jonizacionog profila dat bez informacije o načinu proračuna /1/, /2/ ili je taj proračun krajnje uprošćen /3/. Pristup primenjen u ovom radu omogućava korektan tretman beta zračenja za sve visine radioaktivnog oblaka.

## 2. PRORAČUN JONIZACIONOG PROFILA

Domat elektrona,  $r_0$ , tj. dužina zaustavnog puta zavisi od energije elektrona  $E$ . Na osnovu podataka za aluminijum kao zaustavni medijum /4/, koji se sa dobrom približnošću mogu koristiti i za vazduh uzeto je, za vazduh pod normalnim uslovima:

$$r_0(E) = 290 E^{1.35} \text{ (cm)} \quad (1)$$

pri čemu je energija  $E$  izražena u MeV. Polazeći od rel. (1) možemo dobiti izraz za diferencijalni gubitak energije duž zaustavnog puta

$$\frac{dE(r)}{dr} = \frac{0.741E}{r_0} \left( 1 - \frac{r}{r_0} \right)^{-0.259} \quad (2)$$

gde je  $r_0$  skraćena oznaka za  $r_0(E)$ . Umesto izraza (2), međjutim, korišćen je izraz

$$\frac{dE(r)}{dr} = \frac{3E}{4r_0} \left( 1 + \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (3)$$

koji je mnogo podesniji za predstojeće integracije. Ovo uprošćenje je opravdano obzirom da je integral prekrivanja funkcija (2) i (3) veći od 96%.

### a. Zračenje beskonačno tanke površine

Za ravnu površinu sa homogeno raspoređenim tačkastim izvorima izotropnog zračenja, odgovarajuća integracija bazirana na relaciji (3) daje diferencijalni gubitak energije u funkciji rastojanja od zračeće površine  $z$ ,

$$\frac{dw}{dE} = \frac{3w}{16r_0} \left( 1 - \frac{z^2}{r_0^2} - 2 \ln \frac{z}{r} \right) \quad (4)$$

gde je sa  $w_0$  označena specifična snaga zračenja površine (erg/cm<sup>2</sup>sec). Ako je poluprečnik zračeće površine R, tada se izraz (4) odnosi na deo prostora s obe strane zračeće površine, obuhvaćen cilindrom poluprečnika  $r-r_0$ . Na osnovu elementarnih predstava o radioaktivnom oblaku i rel. (1) zaključujemo da je, za slučaj radioaktivnog oblaka,  $R \gg r_0$ .

Izraz (4), međutim, ne može da se koristi za proračun jonizacionog profila oblaka iz dva razloga:

1.  $r_0$  zavisi od gustine vazduha tj. od visine oblaka
2. za visine oblaka H veće od nekoliko desetina kilometara domet elektrona (srednja energija 1 MeV) postaje uporedljiva sa lokalnom konstantom atmosfere  $H_a$  ( $H_a \approx 7$  km) tj. mora se uzeti u obzir nehomogenost zaustavnog medijuma.

Uzimanjem u obzir tih okolnosti, dobijen je opštiji, primenljiv za sve visine izraz, analogan relaciji (4):

$$\frac{dw}{dh} = \frac{3w_0 \rho(h)}{16r_0 \rho(0)} \left( 1 - \frac{x^2}{r_0^2} - 2 \ln \frac{x}{r_0} \right) \quad (5)$$

gde je h koordinata visine,  $\rho(h)$  i  $\rho(0)$  gustine atmosfere na visini h i na površini mora, respektivno, a x predstavlja redukovanu, tj. efektivnu dužinu, koja za eksponencijalno opadajuću atmosferu ima oblik

$$x(H, h) \equiv x \equiv H_a \left| e^{-H/H_a} - e^{-h/H_a} \right|$$

gde je H visina zračeće površine.

Relacija (5) odnosi se na monoenergetsko zračenje. Spektar beta zračenja radioaktivnog oblaka, međutim, obuhvata elektrone energije od nekoliko desetina keV do nekoliko MeV, što ima bitnog uticaja na visinsku rasprostranjenost jonizacionog profila.

Energetski spektar beta zračenja menja se sa vremenom dovoljno sporo tako da se u odredjenom vremenskom intervalu (više časova) može smatrati približno konstantnim. Na osnovu podataka iz /5/, za energetska raspodelu beta zračenja  $F(E)$  uzeto je

$$F(E) = \begin{cases} 0 & \text{za } 0 < E < 0.05 \text{ MeV} \\ 0.829 & \text{za } 0.05 < E < 0.7 \text{ MeV} \\ 0.406 E^{-2} & \text{za } 0.7 < E < 3.5 \text{ MeV} \\ 0 & \text{za } E > 3.5 \text{ MeV} \end{cases}$$

Smenjivanjem (1) i (5), posle elementarne, mada dosta zametne integracije po energetskom spektru  $F(E)$ , dobijamo:

$$\frac{dw}{dh} = \frac{3w_0 \rho(h)}{16 \cdot 290 \rho(0)} A(Y) \quad (6)$$

gde je preglednosti radi uvedena nova oznaka

$$Y \equiv x(H, h)/290 \quad (7)$$

i gde je

$$A(Y) = \quad (8)$$

$$= \begin{cases} a(Y) = -2.53 \cdot 10^3 Y^2 - 8.93 \ln Y - 16.15 & 0 < Y < 1.75 \cdot 10^{-2} \\ b(Y) = 0.32 Y^2 + 20.37 Y^{-0.259} + 4.58 \ln Y - 20.38 & 1.75 \cdot 10^{-2} < Y < 0.618 \\ c(Y) = 1.44 \cdot 10^{-4} Y^2 + 0.29 Y^{-1.741} + 1.82 \cdot 10^{-2} \ln Y - 5.03 \cdot 10^{-2} & 0.618 < Y < 5.4 \end{cases}$$

Da bi se dobio broj elektron-jon parova potrebno je deponovanu energiju (6) podeliti sa srednjim utroškom energije po oslobođenom elektronu koja iznosi 33 eV. Na taj način je dobijen jonizacioni profil pokazan na slici 1. Specifična energija zračenja od  $w_0 = 2 \text{ erg/cm}^2 \text{ sec}$  je uzeta da bi se izvršilo poredjenje sa krivama Craina/1/ i Hill-a/2/ koje su takodje date na Sl.1. Može se konstatovati veoma dobro slaganje pokazanih krivih. Crain ne daje nikakve podatke o proračunu dok Hill napominje da je proračun izvršen pod pretpostavkom vertikalnog upada elektrona (što je za tretman jednostavnije), čime se može objasniti sistematski pomeraj krive Hill-a ka manjim visinama.

## 2. ZRAČENJE TANKOG SLOJA

Izraz za  $A(Y)$ , rel.(8) ima singularitet za  $Y=0$ , koji se može lako izbeći tako što će se za mala "rastojanja"  $Y$ ,  $A(Y)$  zameniti konstantom. Uzimajući za to rastojanje tačku preseka funkcija  $a(Y)$  i  $b(Y)$ , tj. rastojanje manje od 0.33% od maksimalnog dometa, dobijamo:

$$\frac{dw}{dh} = 1,066 \cdot \rho(h) A(Y)$$

gde prim označava zamenu  $a(y)$  sa konstantom 19.2. a faktor 1,066 je posledica ponovo izvršenog normiranja.

Izraz  $A(Y)$  (odnosno  $1,066 A'(Y)$ ), međutim možemo aproksimirati daleko jednostavnijim izrazom  $B(Y)$

$$B(Y) = \begin{cases} 0,43(Y+0,15)^{-2} + 6,67 \cdot 10^{-4} Y^2 - 0,033 & 0 < Y < 4,55 \\ 0 & \text{za } Y > 4,55 \end{cases}$$

koji je sintetizovan polazeći od funkcije  $c(Y)$  (rel.8). Na Sl.2 pokazan je jonizacioni profil tankog radioaktivnog sloja lociranog na nekoliko visina  $H$ , računat na osnovu  $B(Y)$ . Za visinu  $H=75$  km dat je i proračun na osnovu  $A'(Y)$  - crtkasta kriva. Za ostale visine, obzirom na eksponencijalni karakter atmosfere, profili računati na osnovu  $B(Y)$  i  $A'(Y)$  se praktično ne razlikuju.

Sa Sl.2 se vidi da za  $H > 75$  km, oblik jonizacionog profila kao i lokacija maksimuma skoro ne zavise od visine zračeće površine. Sa smanjenjem visine  $H$  maksimum se sužava da bi za  $H=45$  km ceo profil bio skoncentrisan u neposrednoj blizini zračeće površine.

### 3. ZRAČENJE DEBELOG SLOJA

Pod "debelim" slojem podrazumevamo situaciju kada je vertikalna dimenzija radioaktivnog oblaka uporedljiva ili veća od dometa beta zračenja (elektrona). Takav sloj se može aproksimirati sa više tankih slojeva i odgovarajući doprinosi sabrati:

$$\frac{dw}{dh} = \psi(h) \sum_{i=1}^n c_i B_i(Y)$$

gde je  $c_i$  emisiona sposobnost  $i$ -tog sloja ( $\sum c_i = 1$ ). U specijalnim slučajevima može se dobiti tačan analitički izraz za zračenje debelog sloja. Najjednostavniji a i za praksu, možda, najinteresantiji je slučaj eksponencijalne raspodele emisione sposobnosti debelog sloja

$$c(H) \sim e^{-H/H_a}$$

tj. slučaj u kome je gustina radioaktivnih emitera proporcionalna lokalnoj gustini atmosfere.

Tada posle integracije po debljini sloja, dobijamo

$$\frac{dw}{dh} = \psi(h) \cdot C(Y, \Delta Y)$$

gde je  $C(Y, \Delta Y) =$

$$= 0.43 \left[ (Y+0.15)^2 - (\Delta Y)^2 \right]^{-1} + 6.67 \cdot 10^{-4} Y^2 + 2.22 \cdot 10^{-4} (\Delta Y)^2 - 0.033$$

$C(Y, \Delta Y) =$

za  $Y > \Delta Y$

$$= \frac{0.43}{2\Delta Y} \left[ 13.33 - (\Delta Y + 0.15 + Y)^{-1} - (\Delta Y + 0.15 - Y)^{-1} \right] + 6.67 \cdot 10^{-4} Y \cdot \Delta Y +$$

$$+ 2.22 \cdot 10^{-4} Y^3 (\Delta Y)^{-1} - 0.033$$

za  $Y < \Delta Y$

Veličina  $Y$  je ranije definisana (rel.7) a  $2\Delta Y$  predstavlja, u okviru koncepta redukovane koordinate  $Y$ , "debljinu" oblaka tj.

$$2\Delta Y = \frac{H_a}{290} \left( e^{-H_d/H_a} - e^{-H_v/H_a} \right)$$

gde su  $H_d$  i  $H_v$  visina dna i vrha oblaka, respektivno. Koordinata  $Y$  se računa u odnosu na horizontalnu ravan koja oblak deli na dva dela iste emisijne sposobnosti i koja se nalazi na visini:

$$H = -H_a \ln \frac{1}{2} \left( e^{-H_d/H_a} + e^{-H_v/H_a} \right)$$

Na Sl.3 pokazani su jonizacioni profili debeloslojnog izvora za tri visine  $H$ : 45, 65 i 75 km. Za debljinu sloja uzete su sledeće vrednosti.

$H$	$H_v$	$H_d$	$\Delta H$	$2\Delta Y$
45	58.5	40.5	18	7
65	86.3	60.3	26	0.46
75	100.2	70.2	30	0.11

Na istom grafiku crtkasto su predstavljani jonizacioni profili računati u aproksimaciji tankog sloja (kao na sl.2). Za  $H=75$  km profili su skoro identični dok se za  $H=65$  km može konstatovati kvalitativno slaganje. Za visine oblaka ispod 60 km, debljina oblaka se mora uzimati u obzir pri izračunavanju jonizacionog profila.

#### 4. OPŠTI IZRAZ ZA JONIZACIONI PROFIL RADIOAKTIVNOG OBLAKA

Uzimajući u obzir da je:

a) energija od 1 kT ekvivalentna  $4.2 \cdot 10^{19}$  erg

- b) da na naknadno beta zračenje otpada oko 2% energije fisione eksplozije W
- c) da intenzitet beta zračenja opada sa vremenom kao  $t^{-1.2}$
- d) da je obrazovanje para jon-elektron potrebno utrošiti, u srednjem, energiju od 33 eV.
- e) da je poluprečnik ozračena oblasti približno jednak poluprečniku radioaktivnog oblaka R (jer je  $R \gg r_0$ ).

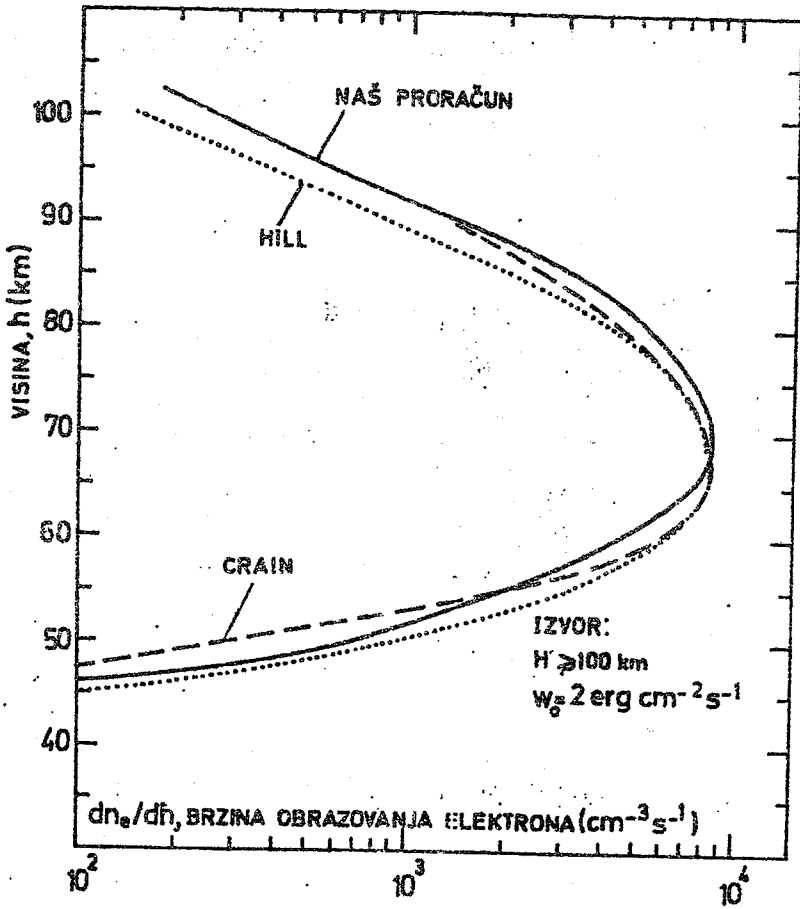
Za brzinu proizvodjenja slobodnih elektrona (i pozitivnih jona) imamo

$$S(h,t) = 6.05 \cdot 10^{13} \frac{W \rho(h)/\rho(0)}{R^2(t) \cdot t^{1.2}} C(Y,AY) \left| \frac{\text{elektrona}}{\text{cm}^3 \text{ sec}} \right|$$

gde je R u km, t u s a W u KT.

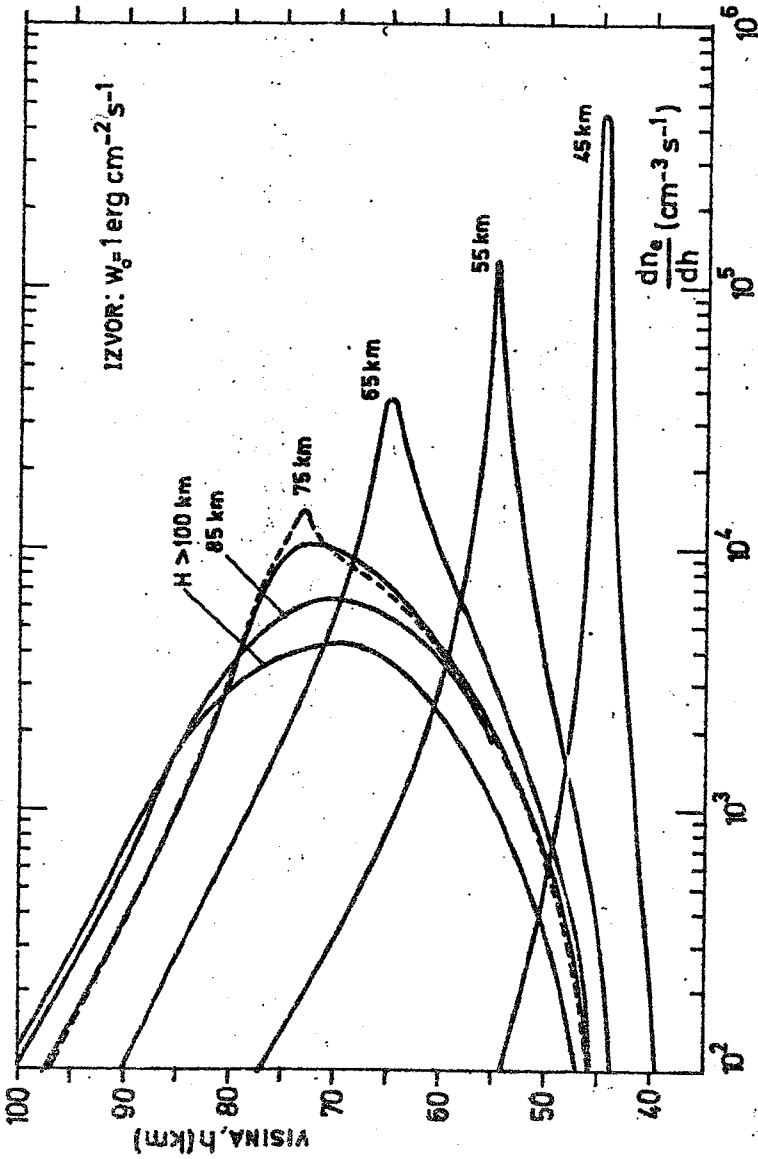
#### LITERATURA

- /1/ Crain C M, J.Geophys.Res. 69, No 21, 4717 (1964)
- /2/ Hill F.L., Radio and Elec.Engin., ang.1965 p.89
- /3/ Latter R., Le Levier R.E. J.Geophys.Res. 68, No 6,1643(1963)
- /4/ Handbuch der Physik, ed Flügge, vol XXXIV, Berlin, 1958
- /5/ Nelms A.T., Cooper J.W. Helth Phys. 1,427(1959)

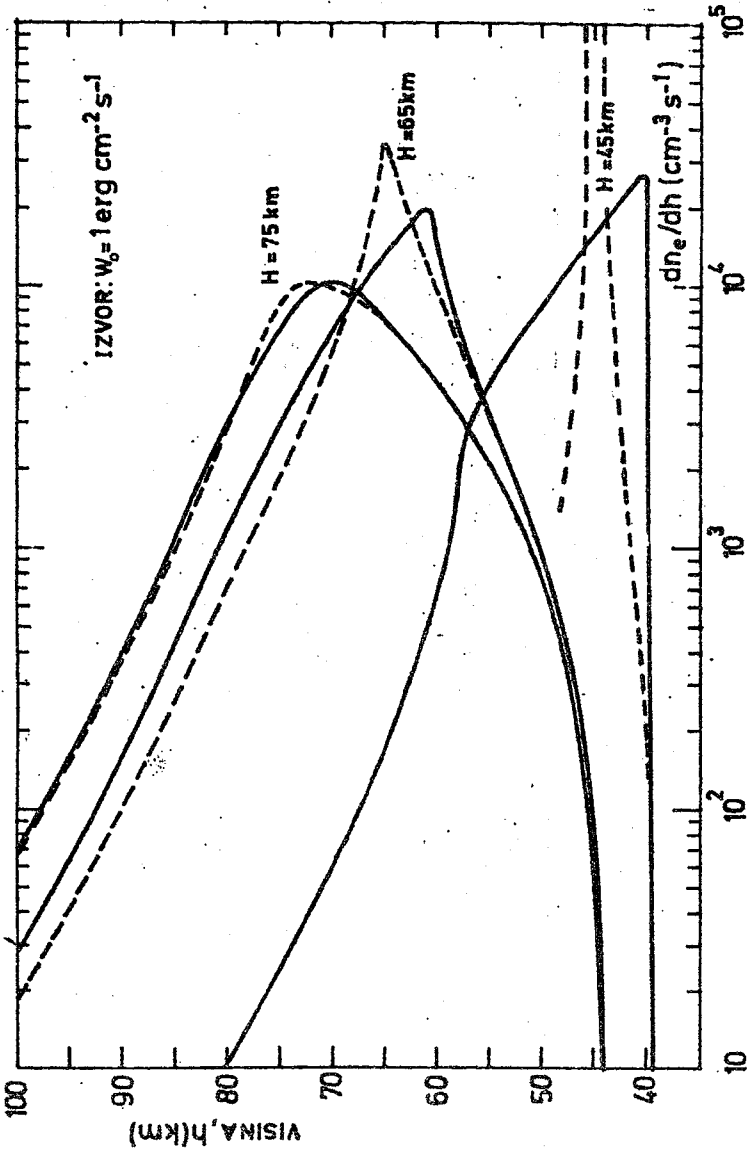


Sl. 1.





Sl. 2



Sl. 3.