

ULTRALJUBIČASTO SUNČEVO ZRAČENJE I NJEGOV ZNAČAJ

Ultraviolet solar radiation and its importance

KRUNOSLAV PREMEC

Državni hidrometeorološki zavod
Grič 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Primljeno 14. prosinca 1998, u konačnom obliku 27. svibnja 1999.

Sažetak: Veliko biološko djelovanje UV zračenja dovelo je do povećanog istraživanja UV zračenja i ozona. U Europi se provodi do sada najveći eksperiment, THESEO, kod kojeg je naglasak stavljen na istraživanje smanjenja ozona iznad urbanih područja. U Hrvatskoj su mjerenja ograničena na nekoliko instrumenata koji mjere prizemni ozon i za sada dva instrumenta koja su u funkciji za mjerenje UV-B zračenja. Da bismo mogli razmatrati promjene UV zračenja, trebamo poznavati čimbenike koji utječu na dnevni i godišnji hod UV radijacije, kao što su varijacije na Suncu, čestice u atmosferi na kojima se događa apsorpcija i raspršavanje, naoblaka, nadmorska visina i refleksija. Najvažniji učinak na UV zračenje ima ozon, a danas različiti antropogeni faktori dovode do znatnih promjena ozona koje se očituju u stvaranju ozonskih rupa i fotosmoga. Smanjenje ozonskog omotača propušta veće količine biološki vrlo učinkovitog UV-B zračenja koje smanjuje fotosintetsku aktivnost kod maritimnih ekosustava i biljaka i tako posredno djeluje na čitav hranidbeni lanac. Osim toga, kod ljudi uzrokuje rak kože, oštećenja oka i slabljenje imunološkog sustava. Zbog toga bi trebalo i kod nas proširiti mjerenje i istraživanje i UV zračenja i ozona.

Ključne riječi: UV-zračenje, ozon, biološki učinci

Abstract: The high biological impact of ultraviolet radiation has boosted research in UV radiation and ozone. THESEO is one of the biggest experiment to date being run in Europe, and its main goal is to investigate ozone decrease above urban areas. In Croatia, nowadays, there are only a few instruments for measuring surface ozone amounts and only two instruments for measuring UV-B radiation. For studying changes in UV radiation, we have to know the factors that impact the diurnal and annual behaviour of UV radiation, such as sun variations, the atmospheric particles where absorption and scattering happens, cloudiness, elevation and reflection. Ozone has the most important impact on UV radiation, but different anthropogenic factors lead to significant changes in ozone amounts, which are reflected in ozone holes and smog formation. A reduction of the ozone layer results in an increase in biologically high active UV-B radiation which decreases the photosynthetic activity of marine ecosystems and plants and so indirectly influences all the food chain. Besides, UV causes skin cancer, eye damage and immunosuppression. Because of all those reasons, we should intensify measurements and research of both UV radiation and ozone over Croatia.

Key words: UV radiation, ozone, biological impacts

1. UVOD

Malen dio Sunčeva elektromagnetskog spektra koji se naziva ultraljubičasto ili UV zračenje ima vrlo veliko značenje za Zemlju. Ulaškom u Zemljinu atmosferu, na velikim visi-

nama kraće valne duljine UV zračenja zajedno s X-zrakama ioniziraju zrak i proizvode ionosferu, koja je vrlo važna za radiokomunikaciju. Prodirući dalje u mezosferu i stratosferu, UV zračenje zagrijava taj dio atmosfere i potiče fotokemijske reakcije u kojima se stva-

ra ozon, koji nas štiti od smrtonosnih doza UV zračenja. Dulji UV valovi prodiru čak i u troposferu, gdje stvaraju fotosmog, potiču fotosintezu i imaju velik biološki učinak. Od tog biološkog učinka od naročite je važnosti učinak na čovjeka, koji se očituje u raku kože, nepravilnostima oka i slabljenju imunološkog sustava. Ovisnost tih učinaka, kao i ostalih štetnih reakcija na biljkama i životinjama, o geografskoj širini i laboratorijske potvrde štetnosti UV zračenja, dovode do povećanog istraživanja UV zračenja i ozona kao glavnog čimbenika u propuštanju UV zračenja.

Nakon što su 1985. objavljeni rezultati britanske antarktičke ekspedicije koja je započela polovicom dvadesetog stoljeća, a koji su pokazali začuđujući trend smanjivanja ozona iznad Antarktika i do 40%, krenulo se u intenzivnije istraživanje ozonskog sloja i UV zračenja iznad Arktika i umjerenih širina sjeverne hemisfere.

Ta su istraživanja u Europi započela 1991. godine kampanjom za istraživanje smanjenja ozona iznad Arktika, EASOE (European Arctic Stratospheric Ozone Experiment). U okviru te kampanje nastojalo se bolje upoznati procese koji uzrokuju smanjenje ozona i pokušati predvidjeti smanjenje ozona u budućnosti. Također se nastojalo istražiti i gibanje kemijski perturbiranog zraka od Arktika preko Europe. Eksperiment EASOE završen je u ožujku 1992, a rezultati su ukazivali na mogućnost velikog smanjenja ozona zbog nažočnosti klorina u atmosferi.

Nakon tog eksperimenta 1994–1995. održan je SESAME (Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Ozone Experiment), koji je pokušao potvrditi rezultate eksperimenta EASOE i bolje proučiti procese i veze između stratosferskog ozona u visokim i umjerenim širinama.

Europska Unija (EU) početkom 1998. godine pokrenula je treću kampanju za motrenje i istraživanje smanjenja ozona iznad Europe, pod imenom THESEO (Third European Stratospheric Experiment on Ozone). Cilj THESEO-a jest istražiti veliko smanjenje ozona u arktičkoj stratosferi, koje je u posljednja tri zimska razdoblja na visinama između 15 i 20 km iznosilo čak do 50%, kao i objasniti trend smanjivanja ozona iznad Europe (ukupni ozon je zimi i u proljeće više od 10% manji nego je bio sedamdesetih godina). Glavni je

naglasak stavljen na istraživanje smanjenja ozona iznad naseljenih područja, kao i istraživanje povezanosti procesa u umjerenim širinama sa smanjenjem ozona iznad Arktika. Osim toga planirano je i ispitivanje učinaka zrakoplova na donju stratosferu. U eksperiment THESEO uključeno je 30 prizemnih stanica, 6 zrakoplova, 1000 ozonosondi, 40 stratosferskih balona te više od 40 znanstvenika. U tom će istraživanju biti isprobani i neki novi instrumenti koji su konstruirani u okviru European Stratospheric Programme. Na istraživanje ozona i UV-B zračenja EU planira u okviru tog programa utrošiti oko 16 milijuna eura.

Kod nas, u Hrvatskoj, za sada je istraživanje ozona ograničeno samo na troposferu. Istraživanja troposferskog ozona započeo je Institut Ruđer Bošković sredinom sedamdesetih godina u Zagrebu i na nekoliko mjesta na Jadranu, a neprekidna mjerenja započela su 1989. na Puntijarci. Institut za medicinska istraživanja 1995. započeo je s mjerenjem prizemnog ozona na dva lokaliteta u Zagrebu. U planu je postavljanje još triju instrumenata za mjerenje troposferskog ozona u okviru Državnog hidrometeorološkog zavoda, na tri različita mjesta u Hrvatskoj.

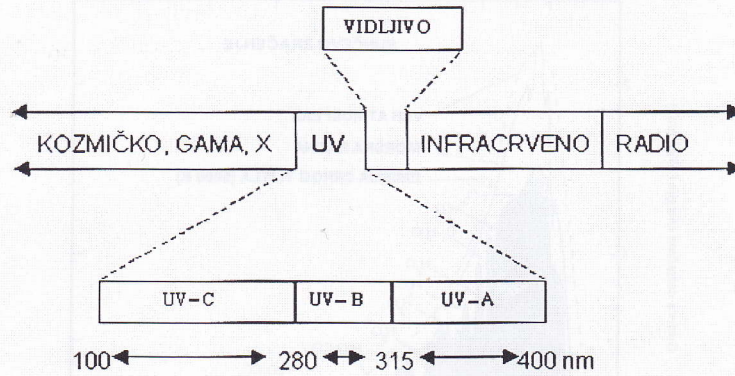
Za mjerenje UV zračenja 1996. u Zadru je bio instaliran jedan širokopojasni instrument Yankee UVB-1, ultraljubičasti piranometar, koji je nažalost već nakon četiri mjeseca prekinuo s radom zbog udara groma. Godine 1997. u Opatiji je postavljen uskopojasni CUVB 1 Kipp & Zonen, instrument koji je i danas u funkciji. Na Horvatovcu je 1998. započeo s radom eritemni instrument Scintec, a u planu je postavljanje još jednog instrumenta CUVB 1 Kipp & Zonen u Umagu.

2. UV ZRAČENJE

Raspon valnih duljina, od X-zračenja (30 nm) do vidljivog zračenja (400 nm) (Coulson, 1975) naziva se ultraljubičasto (UV) zračenje (sl. 1). Od ukupne energije Sunčevog zračenja na UV dio otpada oko 7%.

Radi lakšeg proučavanja UV zračenja, UV spektar podijeljen je (Coulson, 1975) na ove dijelove:

- a) blisko UV zračenje ($400 > \lambda > 300$ nm)
- b) srednje UV zračenje ($300 > \lambda > 200$ nm)



Slika 1. Relativan položaj UV zračenja u elektromagnetskom spektru (Commision..., 1993).

Figure 1. Relative position of UV radiation in the electromagnetic spectrum (Commision..., 1993).

- c) daleko UV zračenje ($200 > \lambda > 100$ nm)
- d) ekstremno UV zračenje ($\lambda < 100$ nm).

Područje valnih duljina kraćih od 200 nm naziva se i vakuumsko UV zračenje, zato jer su za mjerenje u tom području potrebne vakuumske tehnike.

Na osnovi bioloških učinaka izvršena je podjela na ovo:

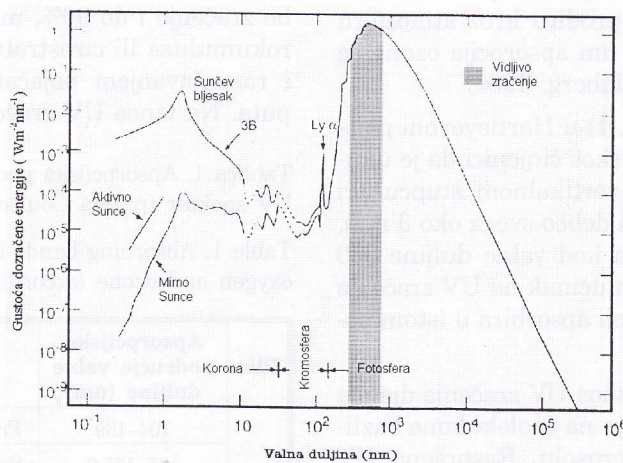
- 1) UV-A ($400 > \lambda > 315$ nm)
- 2) UV-B ($315 > \lambda > 280$ nm)
- 3) UV-C ($\lambda < 280$ nm).

Valna duljina UV zračenja kao i ostale kratkovalne Sunčeve radijacije inverzno je povezana s visinom u Sunčevoj atmosferi, gdje je emitirana (Salby, 1996). Valne duljine veće od

300 nm nastaju u fotosferi, one manje od 200 nm emitirane su iz kromosfere, dok energetski jake valne duljine manje od 50 nm imaju izvorište na većoj visini u koroni (sl. 2).

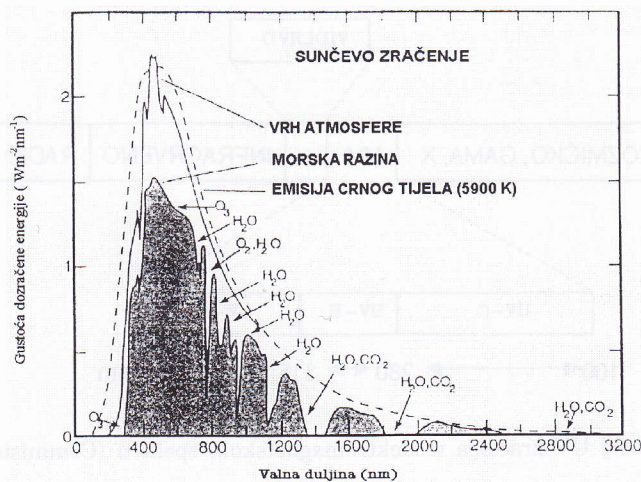
Od elemenata u solarnoj atmosferi koji emitiraju i apsorbiraju UV zračenje najznačajniji je vodik, koji je odgovoran za vrlo jaku Lymanovu rezonantnu vrpцу kod 121.6 nm i širok pojas koji prekriva područje od 65.0 do 91.2 nm. Helij ima sličan, ali slabiji kontinuum u području oko 50 nm, a ostale jake emisijske vrpce imaju željezo, silicij, kisik, dušik, neon i ugljik (Coulson, 1975).

Ulaskom Sunčeve radijacije u Zemljinu atmosferu dolazi do apsorpcije, raspršenja i transmisije zračenja. Dubina prodiranja poje-



Slika 2. Spektar solarnog zračenja u ovisnosti o valnoj duljini, kod različite aktivnosti Sunca (preuzeto iz Salby, 1996).

Figure 2. Spectrum of solar irradiance as a function of wavelength, under different solar activity (after Salby, 1996).



Slika 3. Spektar gustoće energije Sunčevog zračenja na vrhu atmosfere (puna krivulja), na Zemljinoj površini (osjenčano), u usporedbi s emisijskim spektrom crnog tijela na 6000 K (crtkana krivulja). Naznačene su pojedine apsorpcijske tvari (preuzeto iz Salby, 1996).

Figure 3. Spectrum of solar radiation at the top of the atmosphere (solid line) and at the earth's surface (shaded), compared against the emission spectrum of a blackbody at 6000 K (dashed line). Individual absorbing species indicated (after Salby, 1996).

dinih valnih duljina zračenja ovisi o ionizacijskim svojstvima plinova, a to je zbog apsorpcije različitih plinova na različitim visinama (sl. 3).

Valne duljine ispod 100 nm ne možemo pronaći ispod 120 km visine zbog apsorpcije molekula kisika (Goldberg, 1986). Područje valnih duljina od 100 nm do 290 nm ne dopire do tla zbog apsorpcije atmosferskih plinova, od kojih su najvažniji kisik i ozon. Valne duljine 290–330 nm slabije su apsorbirane u ozonu, te djelomično prodiru kroz atmosferu do tla, a već kod 330 nm apsorpcija ozona se može zanemariti (Goldberg, 1986).

Apsorpcija ozona (tab. 1) u Hartleyevom pojasu tako je jaka da usprkos činjenici da je ukupni sadržaj ozona u vertikalnom stupcu pri standardnim uvjetima debeo svega oko 3 mm, samo 1 od 10^{40} fotona kod valne duljine 250 nm dođe do tla. Sličan učinak na UV zračenje kao ozon ima i SO_2 , koji apsorbira u istom području.

Osim apsorpcije, na iznos UV zračenja djeluje i raspršavanje zračenja na molekulama različitih plinova i na aerosolu. Raspršeno UV zračenje donosi za valnu duljinu 400 nm oko 40%, a za valnu duljinu 310 nm oko 200% onog iznosa energije koji imaju izravne UV zrake (Penzar, 1990). To raspršavanje ovisi o valnoj duljini i o veličini čestica, pa tako za

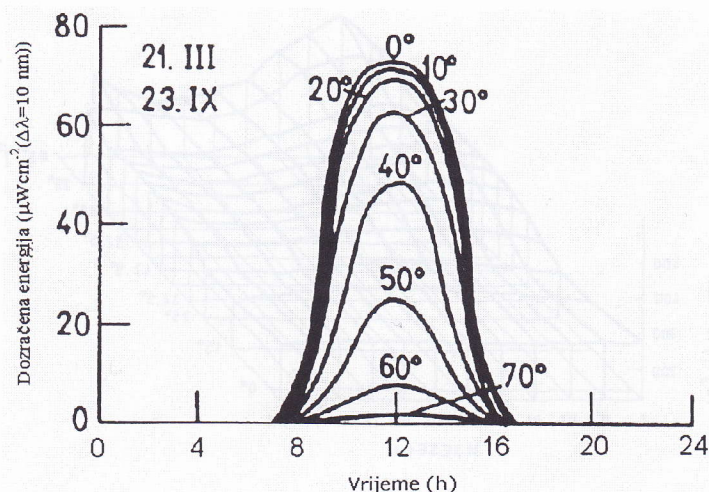
male čestice molekula zraka čiji je radijus puno manji od valne duljine zračenja, vrijedi Rayleighov zakon, po kojem je raspršavanje proporcionalno λ^{-4} , dok za veće čestice, kao što su sastojci oblaka, važi Miejev zakon, gdje je raspršenje razmjerno λ^{-1} . Zbog raspršenja dovoljne količine UV zračenja se postižu i u zaklonjenim mjestima (terase, sjene krošnji, suncobrana i dr.).

Vrsta i količina naoblake također utječe na UV zračenje. Olujni, gusti, debeli oblaci oslabljuju zračenje i do 90%, međutim, tanki sloj cirrostratusa ili cirrostratusa može refleksijom i raspršavanjem pojačati zračenje i do dva puta. Na iznos UV zračenja utječe i nadmor-

Tablica 1. Apsorpcijska područja kisika i ozona za UV spektar (prema Coulsonu, 1975).

Table 1. Absorbing bands in the UV spectrum for oxygen and ozone (according to Coulson, 1975).

Plin	Apsorpcijsko područje valne duljine (nm)	Naziv područja
Kisik	104–139	Friedmanovo područje
	145–175.9	Schumannov kontinuum
	175.9–202.6	Schumann-Rungeov pojas
	202.6–240	Hertzbergov kontinuum
Ozon	200–320	Hartleyev pojas
	300–347	Hugginsonov pojas



Slika 4. Dnevni hod UV zračenja za valnu duljinu 308 nm na raznim geografskim širinama za vrijeme proljetnog i jesenskog ekvinokcija (preuzeto iz Penzar, 1990).

Figure 4. Diurnal behaviour of UV radiation for a 308 nm wavelength at different latitudes during the spring and autumn equinoxes (after Penzar, 1990)

ska visina: veća visina – veće zračenje. Prema nekim istraživanjima (Blumthaler, 1994) postotak porasta zračenja s nadmorskom visinom ovisi o valnoj duljini i to kod valne duljine 300 nm energija UV zračenja se za 1 km nadmorske visine poveća za 24%, dok je kod veće valne duljine (370 nm) taj porast manji i iznosi 9%.

Kad UV zračenje dođe do tla, na njega djeluje još i refleksija, a kao najvažniji reflektor spominje se snijeg, koji vraća i do 85% dolazne energije. Zbog toga su česte pojave opekline na licu, vratu i rukama kod skijaša i onih ljudi koji borave neko vrijeme na snijegu.

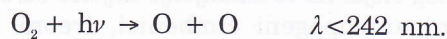
Osim spomenutih učinaka prilikom razmatranja promjena UV zračenja potrebno je uključiti i rotaciju Sunca, koja traje u prosjeku 27 dana i uzrokuje promjene u dalekoj UV radijaciji za nekoliko postotaka (Salby, 1996), a isto tako i 11-godišnje cikluse Sunčevih pjege, koji unose dodatnu pomutnju u interpretaciji višegodišnjeg trenda UV zračenja. UV zračenje ima pravilan dnevni hod, za vedrog vremena. Noću je vrijednost nula, prije podne raste, dostiže maksimum oko podne i zatim opada. Taj hod puno je izraženiji u ekvatornom području, gdje je veća i dozračena energija, dok je u visokim geografskim širinama slabije izražen zbog manjih energija (sl. 4). Godišnji je hod u skladu s godišnjim promjenama podnevne visine Sunca i debljinom ozona,

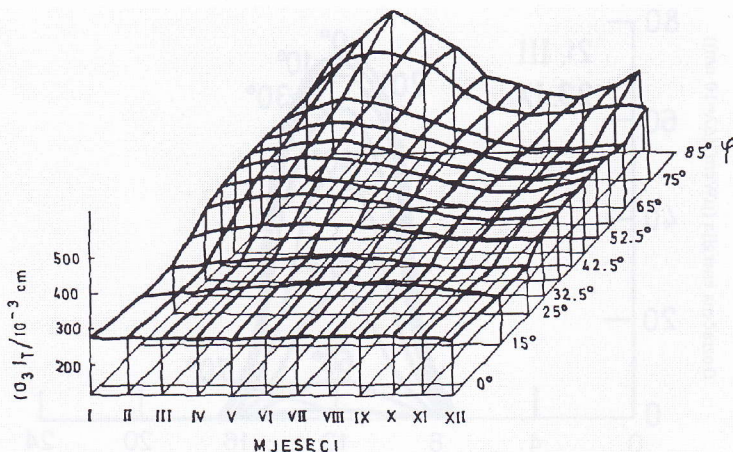
što rezultira najmanjim vrijednostima u prosincu, a najvećima u lipnju.

3. ZNAČAJ I ULOGA OZONA

Najvažniji regulator propusnosti atmosfere za UV zračenje u biološki veoma aktivnom UV-B području jest troatomna molekula kisika, ozon. Ukupni sadržaj ozona u atmosferi iznosi $3 \cdot 10^{13}$ kg, a to je oko 10 ppm (parts per million), volumnih dijelova svih plinova u atmosferi. Prosječna globalna vrijednost ozona jest 300 DU (Dobson Unit), a to odgovara debljini sloja ozona od 3 mm kod standardnih uvjeta, kada bismo sav ozon doveli na morsku razinu. Raspoređen je u donjih 50 km atmosfere; u stratosferi ga ima oko 90%, a u troposferi 10%. Ozonom naročito bogat sloj nalazi se na visinama između 20 i 50 km, i taj se sloj naziva ozonosfera. Osim u tim spomenutim područjima u UV spektru (tab. 1), ozon apsorbira i u vidljivom spektru (Chappuisov pojas, 450–700 nm) i u infracrvenom području, gdje se nalazi vrlo bogato područje s većim brojem vrpca.

UV zračenje odgovorno je i za nastajanje i za raspad molekula ozona. Valne duljine kraće od 242 nm razbijaju molekule kisika:





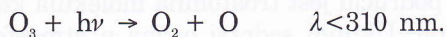
Slika 5. Godišnji hod ukupnog ozona na sjevernoj hemisferi u ovisnosti o geografskoj širini (preuzeto iz Grubišić, 1990).

Figure 5. Yearly course of the total ozone on the northern hemisphere depending on latitude, (after Grubišić, 1990).

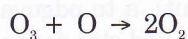
Zatim u trostrukom sudaru atoma i molekula kisika s molekulom M nekog drugog plina (najčešće kisika ili dušika), nastaje ozon, a višak energije oslobađa se kao toplina:



Raspad ili fotodisocijacija molekula ozona posljedica je apsorpcije UV zračenja valnih duljina manjih od 310 nm.



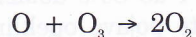
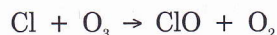
Do raspada može doći i zbog sudara s atomom kisika:



Fotokemijska priroda ozona zajedno s meridionalnim transportom utječe na prostornu raspodjelu ozona (sl. 5). Maksimalne vrijednosti postižu se u visokim geografskim širinama, dok su minimalne u ekvatornom području. Porastom geografske širine jače dolazi do izražaja i godišnji hod ozona, koji ima za umjerene širine maksimum u proljetnim mjesecima (ožujak, travanj), a minimum u jesen (rujan, listopad).

U posljednja dva desetljeća ta je prostorna raspodjela kao i prirodna ravnoteža ozona ozbiljno narušena pojavom tzv. ozonskih rupa, tj. područja u kojima je došlo do smanjenja ozonskog sloja. Za to smanjenje najviše su odgovorni antropogeni čimbenici, freoni ili

CFC-spojevi i haloni, koji postaju aktivni tek u stratosferi. UV zračenje razbija te spojeve i oslobađa vrlo aktivne atome klora i broma koji zatim napadaju i razaraju molekule ozona. Taj proces daje se opisati ovim kemijskim reakcijama:



Sumarno se dobije razgradnja ozona na molekule kisika i slobodan atom klora koji je dalje spreman za razgradnju ozona. Proces uklanjanja klora i broma vrlo je spor, pa oni mogu boraviti u atmosferi i više desetaka godina i pritom razgraditi oko 100.000 molekula ozona. Isti učinak kao freoni i haloni imaju i neki prirodni spojevi kao što su dušični oksid, metan i vodena para.

Te kemijske reakcije potpomažu i termodinamički učinci. Jedan je polarni vrtlog, gotovo zatvorena zapadna stratosferska cirkulacijska cjelina, a drugi su polarni stratosferski oblaci PSC (Polar Stratospheric Cloud) prve i druge vrste. PSC prve vrste sastoje se od kristalića dušične kiseline i nastaju već pri -78°C , dok su PSC druge vrste sastavljeni od kristalića leda i javljaju se pri temperaturi od -85°C .

Stratosferska nazočnost ozona od letalne je važnosti, međutim ozon u troposferi predstavlja onečišćivač. U urbanim područjima gdje je povećana gustoća prometa, prilikom izgaranja goriva u motorima s unutrašnjim izgaranjem oslobađaju se dušični oksidi i ugljikovodici. Za sunčana vremena, uz nisku relativnu vlažnost, dolazi do fotodisocijacije tih spojeva i stvaranja ozona u obliku smečkaste sumaglice. Ta se pojava naziva fotosmog. Štetnost fotosmoga ponajprije se očituje u oštećenju lišća na biljkama, a poslije i na ljudima, kod kojih fotosmog iritira sluznice dišnih organa i oči. Za prizemno onečišćenje ozonom Svjetska zdravstvena organizacija propisala je vrijednost od 0.1 ppm koju prosječna jednosatna vrijednost ne bi smjela prijeći više od jedanput na godinu. Potrebno je istaknuti da fotosmog ima i pozitivan učinak jer slabi UV zračenje i do 20%, i to uglavnom odbijanjem i raspršavanjem.

Problemi fotosmoga i smanjenja stratosferskog ozona međusobno su povezani. Smanjenje stratosferskog ozona propušta veću količinu UV zračenja do Zemljine površine, gdje se intenziviraju fotokemijske reakcije u onečišćenom zraku. Osim toga CFC-spojevi zajedno sa CO₂ spadaju u grupu plinova stakleničkog djelovanja i time utječu na povišenje temperature. Povišena temperatura i povećana količina UV zračenja djeluju poticajno na stvaranje fotosmoga.

4. BIOLOŠKI UČINCI UV ZRAČENJA

Od ukupnog Sunčeva zračenja na UV-B dio otpada manje od 1.5%, ali je ono biološki najučinkovitije. Biološke reakcije ovise o valnoj duljini, ali i o karakteristikama pojedinih organizama.

Jedna od mjera biološke učinkovitosti jest faktor RAF (Radiation Amplification Factor), koji predstavlja postotak povećanja biološki učinkovita zračenja uzrokovanog danom postotnom promjenom ukupnog stupca ozona (npr. RAF=2 znači da smanjenje stupca ukupnog ozona za 1% uzrokuje povećanje biološke učinkovitosti za 2%).

Još je u upotrebi i faktor BAF (Biological Amplification Factor), koji pokazuje za koliko će se povećati pojava raka kože, ako se UV zračenje poveća za 1%. Kao jedinica biološke

učinkovitosti UV zračenja uzima se ona doza zračenja koja je potrebna da se izazove crvenilo, odnosno minimalni eritem kod prosječne kože bijelca. U upotrebi je prije bila jedinica:

MPE (Minimal Perceptible Erythema)

$$1\text{MPE} = 250 \text{ Jm}^{-2} \text{ za } \lambda=296.7 \text{ nm}$$

(Coulson, 1975).

Danas se koristi jedinica:

MED (Minimal Erythema Dose)

$$1\text{MED} = 201 \pm 52 \text{ Jm}^{-2}$$

(Yankee...),

koja je različita za različit fenotip kože.

Ultraljubičasto Sunčevo zračenje ima utjecaj na čitav hranidbeni lanac, pa se njegovi učinci razmatraju kao učinci na vodeni ekosustav, učinci na biljke, te učinak UV-B zračenja na čovjekovo zdravlje (prema Commission..., 1993.).

4.1. Učinak na vodeni ekosustav

Život na Zemlji ovisi o proizvodnji organske biomase. Godišnje se proizvodi oko 10¹¹ tona biomase. Oko polovice tog iznosa proizvode više biljke (žitarice, šume, trava), a preostali dio maritimni ekosustavi. Glavna komponenta tih maritimnih ekosustava jesu fitoplanktonski organizmi, uglavnom jednostanične alge. Samo mali porast UV zračenja može smanjiti produktivnost tih organizama, a to bi imalo velike posljedice na hranidbeni lanac počevši od ličinki, rakova, riba, ptica, pa sve do sisavaca. Procijenjeno je da je 1990. otprilike trećina životinjskih bjelančevina za ljudsku ishranu dobivena iz mora i oceana. Fitoplanktonski organizmi nalaze se u gornjem sloju oceana jer im treba sunčana energija za fotosintezu. Izloženi su jakoj radijaciji i vrlo su osjetljivi na promjene UV zračenja jer nemaju zaštitne epidermalne slojeve koji bi apsorbirali UV. Zbog toga oni stalno optimiziraju svoj vertikalni položaj u vodi kako bi dobili dosta energije za fotosintezu, a istovremeno izbjegli prevelike doze štetnog zračenja (UV slabije prodire kroz vodu). Dnevno naprave vertikalni pomak i do 12 m. Za tu fotoorijentaciju fitoplanktoni koriste UV-A, dok na promjene UV-B nemaju sposobnost reagiranja. UV-B zračenje sprečava i pokretljivost i orijentaciju fitoplanktona. Povećana izloženost

može izbljediti ili previše zatamniti njihove pigmente i time uzrokovati veliko smanjenje fotosintetskih reakcija. Osim toga povećanje UV-B zračenja utječe i na metabolizam, vezanje dušika i na druge parametre u vodenom okolišu. Ekspedicije na Antarktiku osamdesetih godina otkrile su da je proljetno smanjenje ozona od 50% uzrokovalo smanjenje fotosintetskih reakcija za 25%. Fitoplanktona ima najviše u polarnim područjima, dok ih je najmanje u ekvatornom području. Ta je raspodjela uvjetovana raspodjelom UV-B zračenja, a kao dokaz toga može poslužiti cvjetanje algi, koje se javlja u proljeće i jesen, a nestaje ljeti, kada je pojačano zračenje. Fitoplanktoni su i glavni apsorberi ugljičnog dioksida, jer apsorbiraju oko polovice godišnje ispuštenog CO₂ (oko 10¹¹ tona). Na taj način oni utječu i na staklenički efekt.

Povećanje UV-B zračenja djeluje i na druge vodene sustave (ribe, rakove) oštećujući njihovu DNA kada su još u početnoj fazi razvoja.

Prokariotski organizmi, kao cijanobakterije, iskorištavaju atmosferski dušik. Godišnje asimiliraju oko 30 milijuna tona umjetnog dušičnog gnojiva. UV-B inducira smanjenje te asimilacije i time uzrokuje nedostatak dušika u oceanima i kod viših biljaka. Procijenjeno je da smanjenje produkcije fitoplanktona za 5%, koje je uzrokovano smanjenjem ozona za 16%, uzrokuje godišnji gubitak oko 7 milijuna tona ribe.

4.2. Učinak na biljke

Porast UV-B zračenja ima uglavnom negativan učinak na biljnu zajednicu jer smanjuje fotosintetsku aktivnost, visinu biljke, površinu lista, sadržaj lipida, a može promijeniti i kemijski sastav. Smanjenje fotosintetske aktivnosti uzrokuje smanjenje hranjivih tvari i smanjenje apsorpcije CO₂ iz zraka. UV-B uzrokuje smanjenje duljine lista i broj listova, a povećava razgranatost biljke. To ima posljedice na mogućnost primanja potrebne svjetlosti kod mješovitih usjeva. Primijećeno je da se tako može pšenica razvijati na uštrb zobi. Istraživanja su pokazala da smanjenje ozona za 25% daje, zbog povećanog UV-B zračenja, kod soje smanjenje fotosintetskih reakcija za 25% i time smanjenje uroda za 20–25%. Istraživanja u Njemačkoj nisu pokazala nikakav utjecaj povećanja UV-B zračenja na kelj, kupus i salatu, dok je u američkim eksperimen-

tima na Floridi utvrđeno smanjenje uroda za 5% kod pšenice, 21% kod rajčice, 90% kod bundeve. Kod riže, kikirikija i kukuruza nije bilo nikakva utjecaja. Vidljivo je da učinak ovisi o vrstama, sortama biljke kao i njihovim podvrstama. Kada bi se mogle odrediti genetske osnove za UV toleranciju i osjetljivost, dobili bismo i određene praktične postupke uzgoja biljaka kod kojih bi se minimizirao štetan utjecaj zračenja. Crnogorica je također osjetljiva na UV-B. Kod bora *Pinus Taeda* zapaženo je smanjenje visina presadnica.

Biljke imaju i nekoliko mehanizama zaštite. Više biljke stvaraju pigmente, flavonide, koji ih štite od štetnosti zračenja. Kod rotkve, raži i peršina stvaranje tih pigmenta linearno je ovisno o dozi UV-B. Kod ječma, graha i krastavaca UV-B izaziva stvaranje epidermijske tvari slične vosku, koja povećava reflektivnost površine tih biljaka i tako ih štiti od štetnih utjecaja UV zračenja. Još jedan zaštitni mehanizam jest i fotoreaktivacija, koja omogućava obnovu oštećene DNA. Broj enzima koji tu sudjeluju (DNA-fotolijaza) povećava se s povećanjem UV-B zračenja.

Na utjecaj UV-B zračenja superponiraju se i učinci ostalih abiotičkih faktora kao CO₂, temperatura, teški metali i vlaga.

4.3. Učinak UV-B zračenja na čovjekovo zdravlje

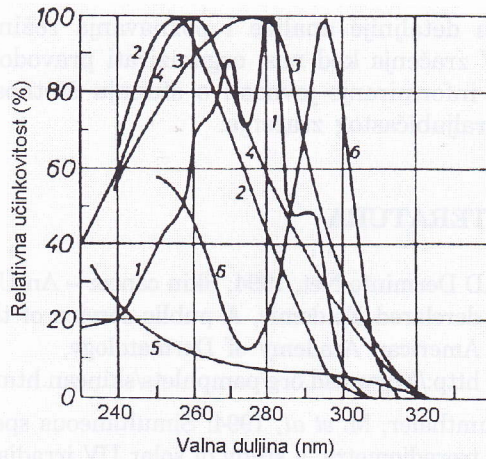
Koristan učinak se očituje u sintezi vitamina D, tretmana kod liječenja psorijaze, smanjenje krvnog tlaka, porastu broja eritrocita i vrijednosti hemoglobina, povećanja pigmentacije i debljanja kože koje omogućava organizmu da se sam zaštiti od štetnog učinka UV-B zračenja (sl. 6).

Akutni, štetni učinci mogu se podijeliti u tri glavna područja:

- oštećenje kože (opekline i rak kože),
- nepravilnosti oka (snježno sljepilo, katarakt),
- promjene kod imunološkog sustava (koje mogu promijeniti tijek raka ili infektivnih bolesti).

Rak kože

UV zračenje potiče nastajanje raka kože oštećujući DNA. U posljednjih dvadesetak godina zabilježen je znatan porast raka kože, a to je



Slika 6. Učinkovitost djelovanja UV zračenja raznih valnih duljina na stvaranje vitamina D (krivulja 1), na bakterije i viruse (krivulja 2), na rast tkiva (krivulja 3), na zgrušavanje bjelancevina (krivulja 4), na crvena krvna tjelešca (krivulja 5), na opekotine kože (krivulja 6), (preuzeto iz Penzar, 1989).

Figure 6. Effectiveness of different wavelengths of UV radiation on vitamine D production (line 1), bacteria and viruses (line 2), the growth of tissue (line 3), protein coagulation (line 4), eritrocites (line 5) and sunburns (line 6), (after Penzar, 1989).

posljedica povećanja različitih slobodnih i radnih aktivnosti koje uključuju duži boravak na otvorenom i dulje izlaganje Sunčevu zračenju.

Postoje dva tipa raka kože:

- a) nemelanomni rak kože (Non Melanoma Skin Cancer-NMSC),
- b) kožni maligni melanom (Cutaneous Malignant Melanoma-CMM).

Preko 90% slučajeva raka kože pripada nemelanomnoj vrsti, koja se može podijeliti na ove:

Rožnatostanični karcinom, SCC (Squamous Cell Carcinomas)

Bazalnostanični karcinom, BCC (Basal Cell Carcinomas)

Rožnatostanični karcinom obično se javlja kao izraslina ili crvena, ljuskava pjega. Obično se javlja na rubu uha, licu i usnama, a može i metastazirati. Ta vrsta raka potvrđuje da je izloženost Sunčevu zračenju, čak i bez smanjenja ozona, glavni uzrok raka kože. Pojava te vrste raka u svezi je s geografskom širinom. U sunčanim područjima, bliže ekvatoru, SCC javlja se češće nego u ostalim područjima. Također je i češća pojava kod ljudi

svjetlije puti jer oni imaju manje zaštitnih pigmenta, kao i kod ljudi koji obavljaju svoje poslove na otvorenom.

Bazalnostanični karcinom javlja se kao mala zadebljana izraslina ili kvržica, obično na glavi, vratu ili rukama, također kod ljudi svjetlije puti. Sporo se širi i potrebno je nekoliko godina da naraste za 1 cm. Ako se ne liječi, te kvržice iskrvare i zatim se stvori krasta, korica. Taj se ciklus ponavlja. BCC ne metastazira, ali može prodrijeti do kostiju i uzrokovati lokalna oštećenja.

Liječenje nemelanomnog raka kože u većini je slučajeva vrlo uspješno, čak i do 99%, ako započne u ranoj fazi. Procjenjuje se da u Americi od nemelanomnog raka umre godišnje oko 2300 ljudi, a smrtnost je malo veća kod SCC nego kod BCC.

Kožni maligni melanom jest rak stanica koje proizvode pigmente melanine koji nas štite od UV zračenja. Pojavljuje se na madežima i ostalim tamnim mjestima na koži, a može se javiti i kod ljudi s tamnom bojom kože, obično na dlanu, stopalu, u ustima ili pod noktima. CMM ima mogućnost metastaziranja. U Americi se godišnje javlja oko 32000 slučajeva tog raka, a od njegovih posljedica umre oko 6800 osoba (svi podaci prema AAD DermInfo Net).

U svezi otkrivanja karcinogenosti UV zračenja proučavaju se preživjele jedinice iz fotosjetljivih bolesti (*Xeroderma Pigmentosum*). Te jedinice pokazuju znatno povećanu učestalost raka kože na dijelovima tijela izloženih UV zračenju. Zato jer imaju genetski određene nedostatke u obnovi oštećenja DNA uzrokovanog UV zračenjem, očito je da je UV zračenje direktno povezano s rakom kože.

Dugo izlaganje Suncu rezultira i starenjem kože. U koži se nalaze i vezivna vlakna koja proizvode stanice fibroblasti. Starenje kože rezultat je gubitka elastičnosti tih vlakana.

Oštećenja oka

UV-B zračenje povezano je s različitim izobličenjima oka, uključujući oštećenja rožnice, leće i mrežnice. Najčešće se javlja katarakt, ali također snježno sljepilo i degeneracija mrežnice, rezultat su djelovanja UV-B zračenja.

Katarakt (mrena na oku) jest prekrivanje leće oka mrežicom koja smanjuje vid i može dove-

sti do sljepila. Oštećenje rožnice naziva se fotokeratitis ili snježno sljepilo, a to je bolno, ali obično prolazno stanje oka. Za razliku od kože, oko postaje osjetljivije nakon ponovnog izlaganja zračenju.

Slabljenje imunološkog sustava

Učinci UV-B zračenja uglavnom su ograničeni na kožu, odnosno njezin epidermijski sloj, jer nema većeg prodiranja zračenja kroz kožu. Međutim, apsorbirano UV-B zračenje može dovesti do slabljenja imunostava.

Koža je često prvi kontakt s infekcijskim tvarima i njezin imuni odgovor prva je reakcija obrane tijela. Kada UV-B prodire kroz kožu ono smanjuje mogućnost adekvatnog odgovora imunološkog sustava na strane supstance. Sve bolesti koje se razvijaju na koži i unutar nje mogu se javiti kao posljedica oslabljenog imunološkog sustava. Tu spadaju zarazne bolesti (ospice, vodene kozice, herpes), parazitske bolesti (malarija), bakteriološke bolesti (tuberkuloza), te gljivične infekcije (guba). UV-B može reaktivirati neke viruse koji su u latentnom stanju u organizmu, kao herpes ili Epstein-Barrov virus, koji uzrokuje Burkittsov limfon i infekcijske mononukleoze.

Opaženo je da ultraljubičasto zračenje uzrokuje i smanjenje bazalnog metabolizma, pojačano izlučivanje želučane kiseline, a može dovesti i do upalnih promjena želuca.

5. ZAKLJUČAK

Čovjek svojim postupcima svjesno i nesvjesno utječe na količinu ozona i propusnost atmosfere za UV zračenje. S obzirom na izložene učinke UV zračenja na čitav hranidbeni lanac, a pogotovo čovjeka, potrebno je posvetiti veću pozornost istraživanju i poznavanju i UV zračenja i ostalih čimbenika koji utječu na povećanje UV zračenja pri tlu. Samim tim bi trebalo u Hrvatskoj razviti mrežu instrumenata za mjerenje UV zračenja i ozona i na-

kon detaljnije analize i poznavanja režima UV zračenja kod nas, organizirati pravodobno informiranje javnosti o stupnju štetnosti ultraljubičastog zračenja.

LITERATURA

- AAD Derminfo Net, 1994: Skin cancer – An Underdeclared Epidemic, A public service of the American Academy of Dermatology, <http://www.aad.org/pamphlets/skincan.html>.
- Blumthaler, M. *et al*, 1994: Simultaneous spectroradiometry: a study of solar UV irradiance at two altitudes. *Geophysical research Letters*, **21**, No. 25, 2805–2808.
- Commission of the European Communities, Directorate-General XII for Science, Research and Development, 1993: Environmental UV Radiation, 78 str.
- Coulson, K.L., 1975: Solar and Terrestrial Radiation. Academic Press, New York, 322 str.
- Goldberg, B., 1986: The Solar Ultraviolet, A Brief Review. in *Advances in Solar Energy*, **3**, 357–386.
- Grubišić, V., 1990: Ozon u atmosferi, polarne ozonske rupe i fotosmog. *Geofizika*, **7**, 95–106.
- Penzar, B. i sur., 1996: Meteorologija za korisnike. Školska knjiga, Hrvatsko meteorološko društvo, Zagreb, 274 str.
- Penzar, I. i B. Penzar, 1989: Agroklimatologija. Školska knjiga, Zagreb, 274 str.
- Penzar, I. i B. Penzar, 1990: Djelovanje ozona na Sunčevo zračenje. *Racionalno korištenje energije u svrhu zaštite čovjekove okoline, Savjetovanje energetičara Hrvatske*, Zadar, 87–94.
- Salby, M.L., 1996: Fundamentals of Atmospheric Physics. Academic Press, New York, 626 str.
- Yanke Environmental System, Inc: Instruction Manual Model UVB-1 Ultraviolet Pyranometer.