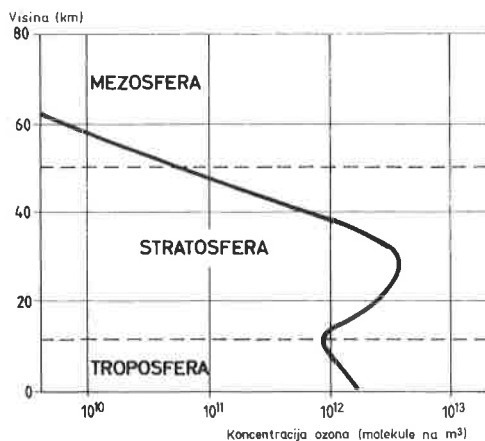


RAZGRADNJA OZONSKOG SLOJA - ZNAJSTVENA PRETPOSTAVKA ILI STVARNA OPASNOST

DARKO MIHLJEVIĆ

OZON I UV ZRAČENJE

Zrak koji udišemo, na razini mora, sadrži približno 21 % dvoatomskog kisika (O_2). Ozon je troatomski oblik kisika (O_3) u kojem su tri atoma kisika povezana u nestabilnu vezu. Ozon je snažan oksident i u atmosferi reagira s mnogim različitim tvarima. U donjem dijelu atmosfere, koji udišemo, ozon je tvar koja nastaje fotokemijskim reakcijama, uključujući zrake svjetlosti, dušikove okside, ugljikovodike i dvoatomski kisik. U stratosferi on je štit protiv razarajućeg ultraljubičastog zračenja (dalje u tekstu UV zračenja). Na slici 1. prikazana je struktura atmosfere i koncentracija ozona. Najveće su koncentracije ozona u stratosferi na visinama između 15 i 40 kilometara. Približno 90 % ozona u atmosferi nalazi se u stratosferi, gdje su najveće koncentracije oko 300 ppb. Najveća koncentracija ozona nad ekvatorijalnim područjem nalazi se na visini od 25 km, a nad polarnim krajevima na visini od približno 15 km.



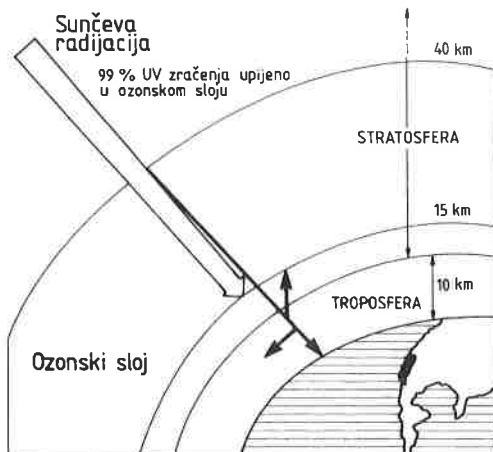
a)

Ozonski sloj u atmosferi često se naziva i "ozonski štit" jer upija najveći dio UV zračenja koje može biti opasno po život na Zemlji. UV zračenje sastoji se od valnih duljina između 0,4 i 0,1 mikrometra, a dalje se dijeli na UVA, UVB i UVC zračenje. UVC zračenje ima najkraću valnu duljinu i najveću energiju. Ono ima dovoljnu energiju da rascijepi dvoatomski kisik (O_2) na dva individualna atoma kisika. Svaki od ta dva atoma kisika spaja se s jednom O_2 molekulom tvoreći ozon. UVC zračenje upijeno je u stratosferi pa ne dopire do površine Zemlje.

UVA zračenje ima najdulju valnu duljinu i može uzrokovati oštećenja stanica. Ono nije potpuno zadržano u stratosferi pa dopire do površine Zemlje.

Najviše pozornosti, s obzirom na problem ozona, posvećuje se UVB zračenju, koje je energetski snažno, i većim dijelom upijeno stratosferskim ozonom.

Ozon je jedini poznati plin koji upija UVB zračenje. Razgradnjom, odnosno stanjivanjem



b)

Sl. 1. a) Struktura atmosfere i koncentracija ozona b) Ograničavanje UV zračenja ozonom

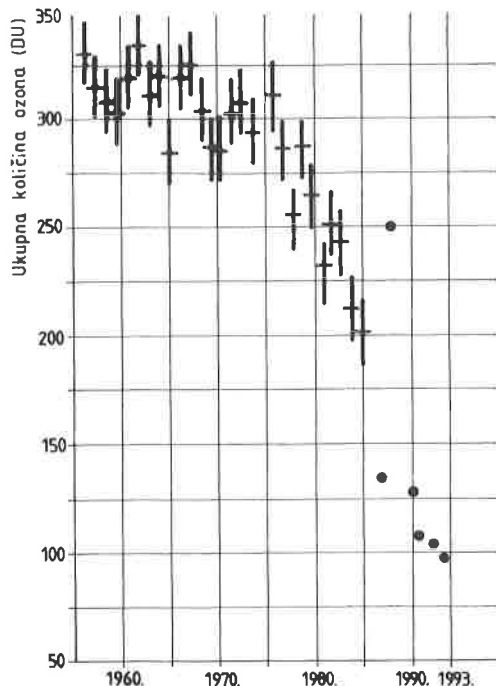
njegova sloja u stratosferi dolazi do značajnoga porasta UVB zračenja koje tako doseže površinu Zemlje. Upravo je taj porast količine UVB zračenja na površini Zemlje opasnost o kojoj se najčešće govori u svezi s problemom ozonskog sloja, jer je to zračenje poznato kao biološki vrlo opasno.

Kako ozon upija UV zračenje u stratosferi, on se ponovo cijepa na dvoatomski (O_2) i jednoatomski (O) kisik uz oslobađanje topline. Prirodni uvjeti koji vladaju u atmosferi ishode u promjenjivoj ravnoteži između stvaranja i razaranja ozona. Općenito 99 % ukupnog UV (UVC + najveći dio UVB) zračenja je upijeno u ozonskom sloju. Upijanje UV zračenja u ozonskom sloju prirodna je "zadaca" ozonskog štita, koji nas čuva od štetnih posljedica UV osobito UVB zračenja.

MJERENJE STRATOSFERSKOG OZONA

Koncentracija stratosferskog ozona prvi je puta izmjerena 1920. opažanjem sa Zemlje pomoću instrumenta poznatog kao Dobsonov ultraljubičasti spektrometar. Dobsonova je jedinica jednakovrijedna koncentraciji ozona od 1 ppb. Dosad je proteklo više od 30 godina neprekinutog mjerenja koncentracije ozona s više od 30 mjesta na površini Zemlje. Većina tih mjesta nalazi se na srednjim geografskim širinama, premda je točnost mjerenja promjenljiva s obzirom na različitu razinu kontrole kakvoće mjerenja.

Satelitska mjerenja koncentracije ozona počela su 70-ih godina, a nastavljena su do danas. Mjerenja obavljena s površine Zemlje prva su ukazala na razgradnju (stanjivanje) ozonskog sloja nad Antarktikom. Članovi Britanske istraživačke antarktičke službe počeli su mjeriti koncentraciju ozona 1957. godine, a 1985. su objavili prve podatke koji su svjedočili o značajnoj razgradnji ozonskog sloja iznad Antarktike. Na slici 2. prikazane su izmjerene vrijednosti koncentracije ozona Britanske službe iz Halley Baya za razdoblje od 1957. do 1985. Dobiveni podaci pokazuju da je koncentracija ozona u razdoblju od 1957. do oko 70-ih godina iznosila 300 Dobbsonovih jedinica (DU



Sl. 2. - Prosječna koncentracija ozona u Dobsonovim jedinicama tijekom kolovoza u Halley Bayu, Antarktika

(Dužina okomitih crtica na dijagramu predstavlja procijenjenu grešku mjerenja i minimalne vrijednosti ozonske "rupe" u razdoblju /1967.-1984./.)

= Dobbson Unit), a zatim pokazuje snažan pad vrijednosti, na 200 DU u 1984. godini. Od 1984. promjenjivost ozonske koncentracije bila je znatna, s 250 DU 1988. do minimalnih 90 DU 1993. U svjetlu najnovijih promjena trend je nedvosmislen: jasno se raspoznaje naglo smanjenje koncentracije ozona u stratosferi. Satelitska mjerenja koncentracije ozona bilježila su i prije 1984. veliko smanjenje koncentracije ozona. Koncentracije su bile tako niske da su se činile nevjerojatnim pa su tumačene greškama u mjerenju. Nakon objavljivanja vijesti o smanjenju koncentracije ozona u stratosferi nad Antarktikom, satelitska mjerenja bila su preispitana, ali su opet potvrdila terestrička opažanja Britanske službe iz Halley Baya. Ta zabilježena razgradnja (stanjivanje) ozonskog sloja nazvana je ozonskom "rupom", iako nije utvrđena stvarna rupa u ozonskom štitu, već smanjena

koncentracija ozona koja se javlja za antarktičkog ljeta.

RAZGRADNJA OZONSKOG SLOJA I CFC SPOJEVI

Pretpostavku da se ozon u stratosferi razgrađuje zbog prisutnosti klorofluorouglijika (u daljnjem tekstu CFC spojeva) stvorili su Molina i Rowland. Ta se pretpostavka najvećim dijelom temeljila na fizikalnim i kemijskim svojstvima CFC-ova. Ideja je pobudila golemu pozornost javnih glasila i o njoj su žestoko raspravljali znanstvenici, kompanije koje su proizvodile CFC spojeve i ostale zainteresirane strane. Javnost je postala zabrinuta jer su proizvodi koji su svakodnevno upotrebljavali, kao npr. lak za kosu, kreme za brijanje, deodoranti, insekticidi itd. bili pakirani u raspršivačima (sprayevima) koji su sadržavali CFC spojeve kao pokretače. Ideja da bi ti spojevi mogli biti odgovorni za ljudsko zdravlje, pobudila je veliki interes javnog mnijenja da se ukine ili barem ograniči proizvodnja koja koristi CFC spojeve.

Glavne postavke Molina-Rowlandove hipoteze su sljedeće:

- CFC spojevi ispušteni ljudskom aktivnošću u donji dio atmosfere kemijski su krajnje stabilni;
- Oni se teško udružuju u nove spojeve (slabo su reaktivni) pa se vrlo dugo zadržavaju u atmosferi (prosječno 100 godina);
- Dodatni problem sastoji se u tome što ne postoji način da se postojeće količine CFC spojeva u atmosferi apsorbiraju. Mogući izuzetak su tla koja upijaju određene količine CFC spojeva iz atmosfere neposredno iznad samog tla;
- Budući da se CFC spojevi dugo zadržavaju u donjem dijelu atmosfere i s obzirom na to da je donji dio atmosfere vrlo dinamičnog kretanja s obilnim miješanjem plinova i čestica, CFC spojevi se vjerojatno procesom disperzije kreću uzlazno i ulaze u stratosferu. Kad jednom dosegnu visinu iznad visine najveće koncentracije ozona, mogu biti uništeni visokoenergetskim sunčevim UV zračenjem. U tom procesu oslobađa se klor kao visokoreaktivni atom;

- Osobodeni, visokoreaktivni klor ulazi u reakcije koje stanjuju ozonski sloj u stratosferi;
- Ishod razgradnje ozona u stratosferi je povećan iznos UV zračenja koje doseže površinu Zemlje. Povećano UVB zračenje uzrokom je povećane učestalosti oboljenja od raka kože, a smatra se da može utjecati na imunološki sustav čovjeka.

UPOTREBA I ISPUŠTANJE KEMIKALIJA KOJE RAZGRADUJU OZONSKI SLOJ

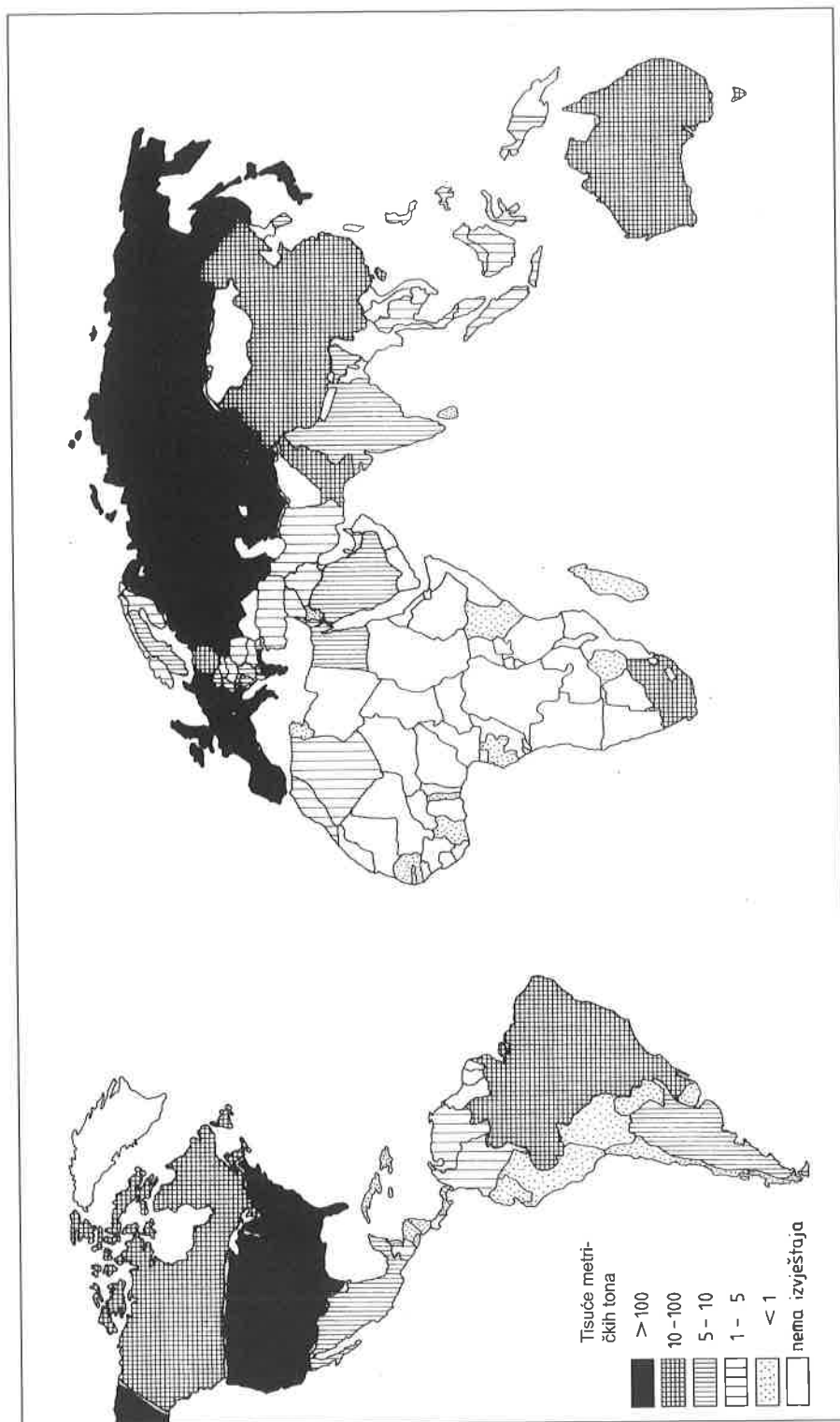
Najčešće vrste i količina kemikalija koje se danas upotrebljavaju i ispuštaju u atmosferu, a odgovorne su za razgradnju ozonskog sloja, prikazane su u tablici 1.

Od 1970-ih do sredine 1980-ih godina otpuštanje kemikalija za koje se drži da uništavaju ozonski sloj iznosilo je približno $1,5 \times 10^6$ metričkih tona godišnje, od čega je na CFC spojeve otpadalo približno 60 %. Osim njihove primjene u raspršivačima (sprejevima), CFC spojevi se koriste kao tehnološki plinovi u rashladnim uređajima i klimatizaciji (air - conditioning). Mnogobrojna sredstva za čišćenje, kao ugljik tetraklorid i metil kloroform sadrže klor i na taj način uništavaju ozon, kao što to čini halon, koji sadrži brom i koristi se u aparatima za gašenje požara.

U tablici 1. prikazano je i približno vrijeme opstanka tih kemikalija koje varira od 10 do 100 godina. Podaci u tablici odnose se na 1985.

Tab. 1. - Korištenje i godišnje otpuštanje kemikalija povezanih s razgradnjom stratosferskog ozona

Kemikalija	Emisija (u 1000 t)	Zadržavanje u atmosferi	Godišnji porast u %	Udio u ozonskom praznjenju (%)
CFC - 12	454	139	5	45
CFC - 11	262	76	5	26
CFC- 113	152	92	10	12
Ugljik tetraklorid	73	67	1	8
Metil kloroform	522	8	7	5
Halon 1301	3	101		4
Halon 1211	79	22	11	0



Sl. 3. - Potrošnja CFC-a u tisućama metričkih tona godišnje

godinu. S obzirom na to da se te kemikalije dugo vremena zadržavaju u atmosferi, te brojčane vrijednosti danas su višestruko veće. Godišnji porast potrošnje navedenih kemikalija do trenutka kad su vlade pojedinih zemalja počele zakonski ograničavati njihovu proizvodnju i potrošnju iznosio je oko 5 do 10 %. Budući da te kemikalije imaju, kao što je prikazano, veoma dug vijek trajanja (zadržavanja) u atmosferi, škodit će nam još dugo vremena. Jedno od prvih ograničenja upotrebe CFC spojeva bilo je ograničavanje njihova korištenja kao pogonskih plinova (propelanata) u raspršivačima (sprayevima). S tom se praksom započelo krajem 1970-ih godina u velikom broju razvijenih zemalja, tako da se mislilo da je 1990-ih godina problem CFC spojeva kao pogonskih plinova praktički riješen. S druge strane, upotreba CFC spojeva za rashladne uređaje porasla je u posljednje vrijeme, posebice u zemljama u razvoju, kao što su Kina, Indija...

POJEDNOSTAVLJEN PRIKAZ KEMIJE KLORA U ATMOSFERI

Prikaz se usredotočuje na CFC spojeve jer su oni najodgovorniji za razaranje ozonskog sloja. Ranije se ustvrdilo da ne postoje prirodne mogućnosti za odstranjenje CFC spojeva iz atmosfere, kao što je slučaj s mnogim drugim kemijskim spojevima u donjem dijelu atmosfere - bilo putem sunčeve svjetlosti, ispiranjem kišom ili pak oksidacijom. CFC spojevi propuštaju svjetlost, netopivi su i ne stupaju u reakcije u kisikom bogatom dijelu atmosfere. Međutim, kad dosegnu gornje dijelove atmosfere, postaju reaktivni. Visokoenergetsko UV zračenje cijepa molekule CFC spojeva oslobađajući klor. Kad se to dogodi, mogu nastupiti slijedeće dvije reakcije:

$$\text{Cl} + \text{O}_3 \Rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$$

$$\text{ClO} + \text{O} \Rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$$

Te dvije jednadžbe definiraju kemijski ciklus koji može razgrađivati ozonski sloj. Klor se spaja s ozonom ($\text{Cl} + \text{O}_3$) te stvara klor oksid (ClO) koji se u drugoj reakciji spaja s jednoatomskim kisikom ($\text{ClO} + \text{O}$) stvarajući ponovo klor. Nadalje, klor može stupiti i u druge reakcije s ozonom dodatno razgrađujući ozonski sloj. Ta

serija reakcija poznata je kao katalitički lanac reakcija. Budući da klor nije odstranjen, već se ponovo pojavljuje kao produkt druge reakcije, cijeli se proces može ponavljati u nedogled. Utvrđeno je da svaki atom klora može uništiti približno 100 000 molekula ozona u vremenu od 1 do 2 godine, prije nego što bude konačno odstranjen iz atmosfere nekim drugim kemijskim reakcijama ili jednostavno ispran kišom. Važnost ovih reakcija je očita kad se zna da godišnje $0,9 \times 10^6$ metričkih tona CFC spojeva bude izbačeno u atmosferu. Važno je naglasiti da ono što se stvarno zbiva u stratosferi glede kemijskih reakcija puno je složenije negoli proces prikazan s prethodne dvije jednostavne kemijske jednadžbe.

Katalitički lanac reakcija klora s molekulama ozona može biti prekinut vezivanjem klora u drugim spojevima u stratosferi. Dvije su mogućnosti:

a) UV zrake razaraju CFC spojeve oslobađajući klor, koji reagira s ozonom stvarajući klor oksid. Klor oksid može tad reagirati s dušik oksidom stvarajući klor nitrat (ClONO_2). Ako se dogodi navedena reakcija, razgradnja ozona je minimalna. Klor nitrat je ipak samo privremeno spremište klora; spoj može biti uništen, a klor ponovo oslobođen.

b) Klor oslobođen iz CFC spojeva može se spojiti s metanom (CH_4) stvarajući klorovodičnu kiselinu. Klorovodična kiselina može se spustiti u niže dijelove atmosfere procesom difuzije i ako uđe u troposferu, pa klor oslobođen reakcijom koja je razorila molekulu ozona može biti ispran kišom. To je konačni kraj većine atoma klora u stratosferi. Ipak, dok su molekule klorovodične kiseline prisutne u stratosferi, one mogu biti uništene sunčevom radijacijom, otpuštajući klor za dodatno uništavanje ozona. Utvrđeno je da lančana reakcija klora koja uništava ozon može biti prekinuta opisanim procesima više od 200 puta. Reakcije koje sudjeluju u uništavanju ozonskog sloja djelomice su odgovorne za opadanje koncentracije ozona na obje hemisfere duž umjerenih geografskih širina. Ipak, ono je mnogo manje od snažnog uništavanja ozona utvrđenog u antarktičkoj ozonskoj "rupi".

ANTARKTIČKA OZONSKA "RUPA"

Budući da je o antarktičkoj ozonskoj rupi prvi put izvješćeno u 1985. godini, ona je pobudila zabrinutost ljudi širom svijeta. Od tada se antarktičko stanjivanje ozona događalo svakoga ljeta u kolovozu, što je danas poznato kao antarktička ozonska rupa. Iznos razgradnje kolebao je od 15% do 70%. Za vrijeme ljeta 1987. i 1989. - 1993., antarktička ozonska rupa zabilježila je razgradnju u rasponu od 40% - 70%. U 1988. ozonska razgradnja iznosila je 15%. Smanjeni iznos razgradnje povezan je s činjenicom da je u tijeku 1988. godine bilo manje polarnih stratosferskih oblaka nad Antarktikom. Za razliku od godina kad je ozonska razgradnja bila visoka, područja s najvećom razgradnjom ozona bila su u nižim dijelovima stratosfere na visinama između 14 i 24 km, gdje su stratosferski oblaci. Značenje tih oblaka objasniti će se u slijedećem odjeljku.

U razmatranju globalne raspodjele ozona važno je spomenuti da je u prirodnim uvjetima najviša koncentracija ozona zabilježena u polarnim predjelima, a najniža oko ekvatora. Na prvi pogled to se može činiti čudnim, budući da se najveći dio ozona stvara u stratosferi pomoću sunčeve energije, a ona je veća oko ekvatora. No, iako se najveći dio ozona stvara oko ekvatora, on se u stratosferi premješta od ekvatora prema polovima u skladu s globalnim kruženjem atmosferskog zraka.

POLARNI STRATOSFERSKI OBLACI

Polarni stratosferski oblaci promatrani su najmanje u posljednjih 100 godina na visinama približno 20 km iznad polarnih krajeva. Oblaci su približno 10-100 km dugački i debeli nekoliko km. Pokazuju svojevrsnu mističnu ljepotu - svjetlucač sjaj boje sedefa. Polarni stratosferski oblaci oblikuju se u tijeku polarne zime. Za vrijeme polarne zime antarktičke zračne mase izolirane su od ostatka atmosfere i kruže oko pola u tzv. polarnom vrtlogu. Vrtlog koji rotira u smjeru desnog vijka, zbog rotacije Zemlje u južnoj hemisferi, stvara se kako se izolirana masa zraka hladi, kondenzira i spušta. Ohlađivanje se zbiva zbog toga što izolirana masa zraka kontinuirano

gubi toplinu kroz radijaciju, a dodatna toplina nedostaje zbog odsustva sunčeva svjetla. Rotirajuća masa zraka u vrtlogu se hladi i spušta, a oblaci se oblikuju kad zračna masa dosegne temperaturu između 195 i 190 K (-78 do -83 stupnja Celzusa). Pri takvim se vrlo niskim temperaturama sitne čestice sumpornog dioksida (0,1 mikrometar) smrzavaju i služe kao agregati za formiranje dušične kiseline (HNO_3). Ti se oblaci nazivaju stratosferskim polarnim oblacima tipa I. Ako temperature padnu ispod 190 K (-83 stupnja Celzusa), vodena se para kondenzira oko nekih, prije formiranih čestica u oblaku tipa I, stvarajući polarne stratosferske oblake tipa II, koji sadrže veće čestice (10 - 100 mikrometra). Prvi scenario, koji stvara oblake tipa I, događa se pri relativno polaganom hlađenju zraka. Ako je hlađenje naglo, vodena se para kondenzira i oblikuje mnogo manje čestice (2 mikrometra). Sedefni polarni stratosferski oblaci tipa II, oblikovani naglim hlađenjem zračnih masa i kondenzacijom vodene pare, oblaci su koje ljudi vide u polarnim krajevima. Za vrijeme stvaranja stratosferskih polarnih oblaka obaju tipova, gotovo se svi dušični oksidi u zračnoj masi vežu u oblacima kao dušična kiselina. Čestice dušične kiseline narastu dovoljno velike da tonu u niže dijelove atmosfere. Ta pojava ima važan ishod u znatno smanjenoj količini dušičnog oksida u atmosferi blizu oblaka. To je taj proces koji djelomice olakšava reakcije razgradnje ozona koji napokon može ograničiti stratosferski ozon u polarnom vrtlogu za više od 1% - 2% dnevno, i to u rano ljeto, kad se sunce ponovno pojavljuje u polarnim krajevima.

U tamnim antarktičkim zimama gotovo sav postojeći dušični oksid vezan je na krajevima čestica u polarnom stratosferskom oblaku ili je odstranjen. Važna reakcija koja dijeli klor glasi $\text{HCl} + \text{ClONO}_2 \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{HNO}_3$. Tako su klorovodična kiselina i klor nitrat (dva važna spoja koja vežu klor) podijeljena na dvomolekularni klor i dušičnu kiselinu. Reakcije razgradnje ozona zbivaju se ljeti, kad se sunce ponovo javlja i razdvaja klor. Dušičnih oksida nema ljeti u antarktičkoj stratosferi pa klor ne može biti izdvojen da bi formirao klor nitrat, jedan od njegovih glavnih spremnika. Zato je klor

slobodan i razara molekule ozona. U rano ljeto reakcije razgradnje ozona mogu biti brze ograničavajući količinu ozona i do 70%, što je i registrirano 1993. godine. Razgradnja ozona u antarktičkom vrtlogu prestaje ljeti kako okoliš zatopljava, a stratosferski polarni oblaci nestaju, otpuštajući dušik natrag u atmosferu, gdje se može spajati s klorom, odstranjujući ga iz lanca reakcija razgradnje ozona. Koncentracija stratosferskog ozona tad raste stvarajući ozonom bogate zračne mase koje ponovno migriraju u polarne krajeve.

Polarni vrtlog oblikuje se i iznad područja sjevernog pola. Kako vrtlog nestaje, on šalje ozonom manjkave zračne mase prema jugu, gdje mogu skrenuti nad naseljena područja Europe i Sjeverne Amerike. U siječnju 1992. satelitski su podaci upozorili na velike količine zraka koje su sadržavale visoku razinu klor monoksida (ClO) nad Sjevernom Europom. Pretpostavlja se, ako bi polarni vrtlog na sjevernoj polukugli opstao mjesec ili više dana, tada bi gubitak ozona u zahvaćenoj masi zraka iznosio 30% - 40%. Godine 1992. zračne mase s viškom koncentracije klor monoksida opažene su nad Europom prostirući se od V. Britanije do Skandinavskog poluotoka. Ono što zabrinjava u svezi sa sjevernim polarnim vrtlogom i razgradnjom ozona u tom području jest spoznaja da on teži cijepanju, pa može doći do pokretanja ozonom deficitarnih zračnih masa prema jugu, za razliku od antarktičkog polarnog vrtloga koji je mnogo manje pokretljiv. Unatoč tomu, 1987. godine jedna zračna masa osiromašena ozonom, koja se oblikovala nad Antartikom skrenula je prema sjeveru nad Melbourne. U prosincu te godine nad tim su gradom izmjerene rekordno niske koncentracije stratosferskog ozona.

RAZGRADNJA OZONA U TROPIMA I UMJERENIM GEOGRAFSKIM ŠIRINAMA

Nedvojbeno je ustanovljeno da se razgradnja ozona u polarnim područjima zbiva uslijed reakcija čestica u polarnim stratosferskim oblacima. Čestice leda javljaju se i u stratosferi nad tropima i povremeno se javljaju znatne količine sumporne kiseline, koje su posljedica

“ubrizgavanja” sumpora u stratosferu putem vulkanskih erupcija. Da te čestice mogu uzrokovati razgradnju ozona - samo je pretpostavka jer nema stvarnih dokaza. Unatoč tomu, u tijeku i poslije erupcije vulkana El Chichon u Meksiku 1982. godine izmjerena je za 10% manja koncentracija ozona na sjevernoj hemisferi. Erupcija vulkana Mt. Pinatubo na Filipinima 1991. godine bila je najveća erupcija ovog stoljeća i “injektirala” je u atmosferu gotovo 20×10^6 metričnih tona sumpornog dioksida. To je stvorilo stratosferski oblak veći od svih polarnih stratosferskih oblaka zajedno. Pretpostavilo se da sumporni oblak sadrži čestice koje omogućuju pojavu razgradnje ozonskog sloja.

Podudaranje tih dviju pojava - oblaka bogatih sumpornim dioksidom koji su kružili nad Zemljom iznad tropa nakon Mt. Pinatubo erupcije i odgovarajućeg pojasa zraka relativno siromašnog ozonom - ukazuje na mogućnost da su one povezane. Ipak, takve podudarnosti ne mogu potvrditi uzročno posljedičnu vezu bez daljnjih dokaza. Zapravo, dodatni podaci i obrada erupcije pokazuju da su krajnje niske vrijednosti ozona nad tropima vjerojatno posljedica erupcije na atmosfersku cirkulaciju prije negoli kemijskih reakcija koje bi prouzročile gubitak ozona.

Ukratko, iako znamo najveći broj podataka o razgradnji ozona u polarnim krajevima (posebice Antarktici), razgradnja ozona (stanjivanje ozonskog sloja) je globalni problem čovječanstva od polova do tropa.

ŠTO MOŽEMO OČEKIVATI

Stvarni problem razgradnje ozona sastoji se zapravo u tome da, čak i pod pretpostavkom da se trenutno obustavi emisija kemikalija koje uzrokuju tu pojavu, problem ne bi prestao, jer milijuni metričkih tona tih kemikalija već postoje u nižim dijelovima atmosfere, probijajući put prema stratosferi. Ako bi trenutno prestala proizvodnja kemikalija koje sadrže CFC spojeve, najveći iznos razgradnje ozonskog sloja mogao bi se očekivati između 2000. i 2020. godine. Kao što je u tablici 1: prikazano, nekoćicina CFC spojeva ima vijek trajanja od 75 do 140 godina. Tako se od 35% CFC-12 molekula

očekuje da u atmosferi budu prisutne sve do 2100. godine, a približno 15% će ih biti i do godine 2200. K tome približno 10% do 15% CFC molekula proizvedenih u posljednje vrijeme još nije ni ušlo u atmosferu, jer su još izolirane u sustavima za rashlađivanje, izolaciju itd.

POSLEDICE

Razgradnja ozona ima mnogobrojne mogućnosti ozbiljne posljedice na stanje okoliša, uključujući negativan utjecaj na prehrambene lance na kopnu i u oceanima, negativne učinke na ljudsko zdravlje, uključujući porast svih vrsta raka kože, očnih mrena, te slabljenja imunološkog sustava organizama. Najnovije studije oštećenja kože izazvanih UVB zračenjem u Torontu, pokazale su 35% povećanje od 1989. do 1993. godine sukladno vrijednostima razgradnje ozonskog sloja.

Bilo je i nagađanja da razgradnja ozonskog sloja može dovesti do smanjenja primarne produkcije u svjetskim oceanima. Budući da je u posljednje vrijeme ozonski sloj iznad Antarktika smanjen za gotovo 50%, s više UVB zračenja doseže površinu oceana. Nestanak ili pad stvaranja fitoplanktona (mikroskopske morske alge i fotosintetičke bakterije koje plutaju blizu površine oceana) imao bi negativan utjecaj na raznolikost (i brojnost) ostalih morskih organizama, budući da s njim počinje prehrambeni lanac. Posljednja istraživanja antarktičkih voda ispod atmosfere osiromašene koncentracije ozona pokazuju pad primarne produkcije fitoplanktona od 6% do 12%, što se povezuje s razgradnjom ozonskog sloja. Poremećaji prehrambenih lanaca u oceanima mogu negativno utjecati na ljude čije se egzistencija temelji na gospodarenju morem. Isto tako, budući da je fitoplankton spremište atmosferskog CO_2 , njegov poremećaj može povećati koncentraciju CO_2 u atmosferi povećavajući globalno zagrijavanje.

Ako razgradnja ozonskog sloja postaje sve raširenija, utječući na glavne prehrambene kulture (žito, kukuruz, grah i rižu), moglo bi doći do ozbiljnih socijalnih posljedica širom svijeta. Pad proizvodnje od 10% do 15% mogao bi imati neslućene posljedice (pomislamo samo koliko

je uz današnju proizvodnju hrane gladnih i neishranjenih!).

O utjecaju razgradnje ozonskog sloja na mogućnost raznovrsnih oboljenja ozbiljno se i naveliko raspravljalo. Postoji opća suglasnost da bi taj utjecaj bio negativan i ishodio bi u porastu različitih (novonastalih a time i neistraženih) bolesti. Jedan od najozbiljnijih rizika koji se očekuje je porast različitih malignih oboljenja, uključujući i gotovo uvijek pogibeljni melanom. UV zračenje može oštetiti oči, uzrokujući mrenu, očnu bolest obilježenu zamućivanjem leća i udvostručenjem slike, te konačno gubitkom vida. Ljudi danas sve više izabiru naočale s lećama koje smanjuju prodor UV zraka do očiju. Povećanje izloženosti UV zračenju može također štetno djelovati na ljudski imunološki sustav. Primjerice, pretpostavlja se da razgradnja ozona može dodatno oslabiti već narušen imunološki sustav ljudi oboljelih od AIDS virusa, ishodeći daljnjim povećanjem mortaliteta oboljelih, te naglom skraćivanju vremena od zaraze do pojave prvih simptoma bolesti. Nadalje, pretpostavlja se da pad učinkovitosti ljudskog imunološkog sustava može ishoditi daljnjim povećanjem različitih vrsta bolesti.

GOSPODARSTVENE POSLEDICE

Veliko, diplomatsko postignuće ostvareno je 1987. godine, kad su 24 zemlje potpisale Montrealski protokol. Protokol je osmislio plan, koji bi barem u prvo vrijeme ograničio upotrebu CFC spojeva do 50%. Čovječanstvo je napokon postalo svjesno da razgradnja ozonskog sloja predstavlja mnogo složeniji problem nego što se dosad mislilo. Unatoč postignutim sporazumima o ograničenju upotrebe kemikalija koje oštećuju ozonski sloj, postalo je jasno da će razgradnja ozona ishoditi s 5% do 20% povećanom UV radijacijom na površini Zemlje u slijedećih 40 godina uzrokujući ekološke poremećaje i probleme ljudskoga zdravlja. Štoviše, čak ni sve kemikalije koje uzrokuju razgradnju ozonskog sloja nisu bile obuhvaćene Protokolom, koji poziva na potpuni prestanak korištenja CFC spojeva do 1999. godine. Poseban problem u provođenju ove zadaće je gospodarstveni procjep između bogatih i siromašnih zemalja.

Primjerice Kina i Indija (gotovo 50% svjetskog stanovništva) nisu potpisale Protokol. Nedostatak njihova potpisa u dokumentima Protokola vjerojatno je povezan s ulaganjima u rashladne sustave, kao i činjenicom da je ekološki prihvatljiva zamjena za CFC spojeve oko šest puta skuplja. Iz toga se može pretpostaviti da će siromašnije zemlje slabije ili nikako podržati plan o ukidanju upotrebe CFC spojeva.

ZAKLJUČAK

Koncentracija ozona u atmosferi mjeri se dulje od 70 godina, a mjerenja u posljednjih desetak godina pokazuju nedvosmislen trend - koncentracija ozona drastično se smanjuje. Molina i Sherwood (1974.) upozorili su da bi razgradnja ozonskog sloja mogla biti posljedica upotrebe CFC (klorofluorouglijaka) spojeva. Pretpostavka se temeljila na nekolicini činjenica: stabilnosti CFC spojeva u donjem dijelu atmosfere, te njihovoj mogućnosti prodora u gornje dijelove atmosfere, gdje ih uništava visokoenergetsko UV (ultraljubičasto) zračenje oslobađajući klor. Klor ulazi u katalitički lanac reakcija koji razgrađuje ozonski sloj. Posljedice su povećano UV zračenje sa svim ekološkim i socijalnim posljedicama.

Antarktička ozonska rupa prepoznata je 1985. godine, uzrokujući općenitu zabrinutost ljudi. Posebno značenje za razumijevanje pojave ozonske rupe imaju složeni fizičko-kemijski procesi koji se zbivaju u polarnom vrtlogu. U tropima je također pretpostavljena razgradnja ozona. Milijuni tona spojeva koji mogu oštetiti ozonski sloj nalaze se u donjem djelu atmosfere probijajući se u stratosferu. I pod pretpostavkom da se trenutno prestanu proizvoditi i upotrebljavati CFC spojevi problem ne bi iščeznuo, već bi se i pogoršao oko 2020. godine.

Opasnosti se vide u mogućnosti oštećenja prehrambenih lanaca na kopnu i moru, narušavanju ljudskog zdravlja, uključujući povećanje malignih bolesti, mrena te pada imunološkog sustava. Mnoge zemlje složile su se s Montrealskim protokolom koji predviđa potpunu obustavu proizvodnje opasnih kemikalija do 1999. godine. Opći problem predstavljaju siromašne zemlje s velikim brojem stanovništva i zemlje u razvoju koje se zbog gospodarstvenih razloga nisu obvezale na poštovanje Protokola. Moguća strategija rukovođenja problemom razgradnje ozona uključuje prikupljanje postojećih CFC spojeva i njihovo ponovno korištenje u zatvorenim sustavima te moguće injektiranje kemikalija u stratosferu, koje bi onemogućavale katalitičke lankačane reakcije.

16. 8. MEĐUNARODNI DAN ZAŠTITE OZONSKOG OMOTAČA

LITERATURA

- Atkinson, R. J., Matthews, W. A., Newman, P. A., and Plumb, R. A. (1989): Evidence of mid latitude impact of Antarctic ozone depletion. *Nature* 340: 290-294.
- Brouder, P. (1986) (June): Annals of chemistry in the face of doubt. *New Yorker*, pp. 20-87.
- Brown, I. R., Flavin, C. and Postel, S. (1991): Saving the planet: how to shape an environmentally sustainable global economy. New York, W.W. Norton.
- Cicerone, R. J., Elliott, S. and Turco, R. P. (1991): Reduced Antarctic ozone depletions in a model with hydrocarbon injections. *Science* 254: 1191-1194.
- Hamil, P., and Toon, O.B. (1991): Polar stratospheric clouds and the ozone hole. *Physics today* 44 (12): 34-42.
- Kerr, R. A. (1992): New assaults seen on Earth's ozone Shield. *Science* 255: 797-798.
- Horgan, J. (1992): Volcanic disruption. *Scientific american* 266 (3): 28-29.
- Kerr, J. B. and McElroy, C. T. (1993): Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science* 262: 1032-1034.
- Khalil, M. A. K., and Rasmussen, R. A. (1989): The potential of soils as a sink of chlorofluorocarbons and other man made chlorocarbons. *Geophysical Research Letters* 16 (7): 679-682.
- Mackenzie, D. (1990, June 30): Cheap alternatives for CFCs. *New Scientist*, pp. 39-40.
- Makhijani, Arinn, Bickel, A. and Makhijani, Annie. (1990, May-June): Still working on the ozone hole. *Technology Review*, pp. 53-59.
- Molina, M. J., and Rowland, F. S. (1974): Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalysed distribution of ozone. *Nature* 249: 810-812.
- Rowland, F. S. (1990): Stratospheric ozone depletion by chlorofluorocarbons. *Ambio* 19 (6-7): 281-292.
- Rowland, F. S. (1989): Chlorofluorocarbons and the depletion of stratospheric ozone. *American Scientist* 77: 36-45.
- Toon, O. B. and Turco, R. P. (1991): Polar stratospheric clouds and ozone depletion. *Scientific American* 264 (6): 68-74.
- Shea, C. P. (1991): Disarming refrigerators. *World Watch* 4 (3): 36.
- Shea, C. P. (1989): Mending the Earth's shield. *World Watch* 2 (1): 28-34.
- Smith, R. C., Prezelin, B. B., Baker, K. S., Bidigare, R. R., Boucher, N. P., Coley, T., Karentz, D., Macintyre, S., Matlick, H. A., Menzies, D., Ondrusek, M., Wan, Z., and Waters, K. J. (1992): Ozone depletion: ultraviolet saturation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science* 255: 952-959.
- Stolarski, R. S. (1988): The Antarctic ozone hole. *Scientific American* 258 (1): 30-36.
- Webster, C. R., May, R. D., Toorey, D. W., Avallone, L. M., Anderson, J. G., Newman, P., Lait, L., Schoeberl, M. R., Elkins, J. W. and Chay K. R. (1993): Chlorine chemistry on polar stratospheric cloud particles in the Arctic winter. *Science* 261: 1130-1134.