**Др Драган Гајић, др Југослав Карамарковић**

# Озонска рупа и UV зрачење - да ли има разлога за страх?

Планета Земља састоји се од атмосфере, хидросфере и основног тела. Атмосфера је гасовити омотач Земље. Заједно са вишим слојевима литосфере (спољашњи стеновити омотач Земље) и хидросфере чини биосферу - сферу живота, у којој се развија живот људи, животиња и биљака. Сматра се да је живот могућ до висине 10-13 $km$ изнад Земљине површине, односно до 3 $km$ у њеној дубини.

Процењује се да је маса Земљине атмосфере око $5.157 \cdot 10^{15}\,t$, што је нешто мање од милионитог дела масе саме Земље ($5.98 \cdot 10^{21}\,t$).

Атмосфера Земље представља релативно стабилну смешу неколико стотина врста гасова различитог порекла. Запремински процентуални износи појединих гасова у њој су: азот 78.084%, кисеоник 20.946%, аргон 0.934%, угљен-диоксид 0.0324%, неон $1.818 \cdot 10^{-3}$%, хелијум $5.24 \cdot 10^{-4}$%, метан $(1.2 - 1.5) \cdot 10^{-4}$%, криптон $1.14 \cdot 10^{-4}$%, водоник $5 \cdot 10^{-4}$%, итд. Поред ових гасова у атмосфери Земље присутне су и тзв. променљиве компоненте: водена пара, аеросоли, фотохемијски смог, итд. Промене њихове концентрације условљене су деловањем више фактора: испаравања и кондензације, хоризонталних и вертикалних струјања ваздушних маса, индустријских загађења, вулканских ерупција, избацивања живе и неживе биомасе, метаболичких процеса микроорганизама у тлу и океану, итд.

Истраживања су показала да су температурски режим и хемија атмосфере регулисани гасовима којих у атмосфери има јако мало. Промене концентрација таквих примеса у великој мери условљене су деловањем људског фактора. Прорачуни показују да се на процесе у атмосфери њихови утицаји испољавају када им је релативна концентрација најмање $10^{-7} - 10^{-8}$.

Планета Земља стара је између 4.6 и 5 милијарди година. Данас је опште прихваћено становиште да су океан и атмосфера настали дегазацијом тла и унутрашњости. У првих 500 милиона година атмосфера се састојала од водоника, водене паре, метана и угљен-диоксида, а пре 3.5 милијарди година у њеном саставу су, највероватније, доминирали угљен-диоксид, угљен-моноксид, водена пара, азот и водоник. У првом стадијуму развоја Земље у атмосфери није било слободног кисеоника. Савремена атмосфера је секундарног порекла. До измена у саставу атмосфере долазило је због дисипације појединих гасова, вулканских активности, дисоцијације под деловањем ултра-љубичастог UV зрачења, ослобађања гасова из литосфере и њихове хемијске реакције са минералима у Земљиној кори, деловањем живих организама, итд. Пре око 4 милијарде година на Земљи су, са хлађењем њене површине, створени услови за кондензовање водене паре и настанак хидросфере. У њој су, абиогеним путем или "засејавањем" из Космоса, формирани молекули сложенијих органских једињења. Са настанком живота (модро зелених алги) долази до процеса фотосинтезе, апсорбовања угљен-диоксида и ослобађања кисеоника. Временом, под деловањем UV зрачења долази до дисоцијације молекула кисеоника и стварања озона у тројним процесима.

Пре око милијарду година створен је танак озонски слој. Његова је концентрација пре око 600 милиона година била свега око 10% од данашње. То је ипак било довољно да се апсорбује штетно UV зрачење, што је омогућило егзистенцију и ширење живота и на копно. Тиме су живи организми допринели да Земља данас има сасвим другачију атмосферу у односу на остале планете Сунчевог система. Треба нагласити, да када би дошло до престанка обнављања кисеоника од стране биљака, он би, због своје високе хемијске активности и везивања са различитим елементима у Земљиној кори, као слободан нестао из атмосфере за свега неколико хиљада година. При том основну улогу у обнављању атмосферског кисеоника и апсорпцији угљен-диоксида има планктон у свецком мору, а не високо растиње.

**Тропосфера** је најнижи слој атмсофере. У њој се налази око 80% масе читаве атмосфере. Њена висина је 17-18 $km$ у појасу између 42° северне и јужне географске ширине, а изван тог појаса она се простире до висине од 11 $km$. Лети се њена висина повећава, а зими смањује. За тропосферу је карактеристично опадање температуре са висином, при чему се температурски режим регулише турбулентним кретањима ваздушних маса. Тропосфера је слој у коме се одвијају метеоролошке промене.

Значајан регулациони фактор температурског режима у тропосфери је угљен-диоксид. То посебно долази до изражаја у последњих неколико година са порастом ефекта стаклене баште и његовом директном последицом у виду глобалног загревања на површини Земље.

Земљина атмосфера слабо апсорбује видљиво и део UV зрачења са највећим таласним дужинама. Један део тог зрачења

подлога рефлектује, а део апсорбује. Због апсорбоване енергије, флукса топлоте из топлије унутрашњости, ослобођене топлоте при распаду радиоактивних материјала у кори, долази до загревања Земљине површине. Због тога она у атмосферу емитује електромагнетно зрачење, које је, с обзиром на температуру површине, у IC области ($\lambda \sim 8 - 10\,\mu m$). Зато део овог зрачења остаје заробљен у атмосфери. У тропосфери се нагомилава енергија IC зрачења, што је праћено загревањем атмосфере и површине планете и ублажавањем разлика између ноћне и дневне температуре. Процес загревања прекида се на вишој температури, на којој површина планете емитује зрачење за које је атмосфера прозрачна и када је успостављена равнотежа између апсорбоване и реемитоване енергије.

Заробљени део енергије у атмосфери Земље утолико је већи што је већа количина (концентрација) молекула $CO_2$ у њој. У тропосфери, због људских активности (пре свега појачаног сагоревања фосилних горива и угрожавања флоре), данас се количина $CO_2$ повећава за 0.3% годишње. Прорачуни показују да би удвостручење процента $CO_2$ довело до пораста просечне температуре у сувој атмосфери од скоро $3^\circ\,C$ ($11^\circ\,C$ у поларним областима и $2^\circ\,C$ у тропима). На јужној полулопти пораст температуре био би мањи, јер би се тамо због веће водене површине више апсорбовао $CO_2$. Треба напоменути да пораст температуре свецког мора смањује његову способност апсорпције $CO_2$, што још више потенцира ефекат стаклене баште. Јасно је да то данас представља можда кључни еколошки проблем Земље. Не треба губити из вида да је на Венери ефекат стаклене баште најизразитији у Сунчевом систему и да тамо температура при тлу достиже око $480\,^\circ C$. То је директна последица њене јако густе атмосфере (око сто пута гушће од атмосфере Земље), у којој преоваладава $CO_2$ (96%). Висока концентрација $CO_2$ доводи до загревања тропосфере, што узрокује хлађење стратосфере и поспешивање деструкције озонског слоја.

**Стратосфера** се надовезује на тропопаузу, слој ширине 1-3 $km$ изнад тропосфере. Стратосфера се протеже до висине од педесетак километара изнад површине Земље. У нижој стратосфери температура зими слабо опада, а лети слабо расте са висином. На висинама од 34-36 $km$, међутим, температура почиње знатно брже да расте, да би на горњој граници стратосфере достигла температуру од око 270 $K$. За живот на Земљи од пресудног значја је присуство озона у стратосфери.

**Озон** је алотропска модификација кисеоника која у свом молекулу има три атома кисеоника ($O_3$), за разлику од обичног молекула кисеоника који има два ($O_2$). Озон је откривен 1839. године од стране немачког научника C.F. Schonbein-a. Он настаје фотолизом или приликом електричних пражњења, тако што се најпре један молекул кисеоника разложи на атоме, а затим атом и молекул кисеоника награде молекул озона. Име потиче од грчке речи *озеин* што значи мирисати. То је гас који је 2.5 пута гушћи од кисеоника. На $-112^\circ C$ кондензује се у јарко плаву течност. Моћан је оксидант, а као концентрован гас или течност јако је експлозиван.

Озон је такозвани *trace gas* (енгл.), што значи да је врло редак у атмосфери, тј. да се јавља само у траговима. У просеку на сваких 10 милиона молекула у атмосфери три су молекули озона. И поред мале концентрације игра виталну улогу за организме на површини Земље. Јако је нехомогено распоређен у атмосфери. На пример, његова концентрација је $10^{12}\,cm^{-3}$ на висини од $H = 15\,km$, затим концентрација расте до $10^{13}\,cm^{-3}$ на $H = 25\,km$, па затим пада на $10^{11}\,cm^{-3}$ на $H = 45\,km$.

Озон се налази у две области Земљине атмосфере: већина озона (око 90%) налази се у стратосфери и назива се **озонски слој**, док је преостали озон лоциран у тропосфери. Тропосферски озон настаје дифузијом из стратосфере, при електричним пражњењима, али и у индустријским хемијским процесима. У тропосфери озон је загађивач. То је јак фотохемијски оксидант који оштећује гуму, пластику, али и животињски и биљни свет; код човека оштећује плућно ткиво. Озонско загађење настало у урбаним срединама шири се ветром на стотине километара у руралне и шумовите области, изазивајући штету у производњи пољопривредних култура и расту шума. Уз сумпор-диоксид ($SO_2$) и азот-диоксид ($NO_2$), озон је највећи загађивач.

Функционисање озона у стратосфери дефинишу Chapmen-ове реакције:

| | | |
|---|---|---|
| $O_2 + h\nu \to O + O$ | $(\lambda < 240\,nm)$ | фотолитичка дисоцијација |
| $O + O_2 \to O_3$ | | стварање озона |
| $O_3 + h\nu \to O_2 + O$ | $(\lambda < 320\,nm)$ | апсорпција UV зрачења |
| $O + O_3$ | | рекомбинација |

Реакција рекомбинације је спора, и када би само она била узрок нестајања озона, озонски слој био би два пута дебљи него што јесте. Осим кисеоничног (Chapman-овог) циклуса рекомбинације, постоје и азотни, водонични и хлорни циклус рекомбинације. То

су тзв. каталитичке рекомбинације. Тренутно стање озонског слоја је резултат динамичке равнотеже између фотолизе и рекомбинације; повећање рекомбинације, изазвано повећањем концентрације катализатора, резултује смањивањем озонског слоја.

Дебљина озонског слоја мери се Добсоновим јединицама, DU (Dobson Unit). Када би се сав озон из стратосфере спустио на Земљу, и довео на услове од $t = 0°C$, $p = 10^5\,Pa$, његова дебљина била би у просеку око 3 $mm$. Ова дебљина слоја одговара 300 DU. Изражено у апсолутним јединицама 1 DU= $2.7 \cdot 10^{16} molekula/cm^2$.

Од свих каталитичких рекомбинација најважнији је хлорни циклус рекомбинације. Извори хлора у атмосфери су:

| Хлорофлуорокарбонати CFC's | хем. формула | комерцијална имена |
|---|---|---|
| Трихлорофлуорометан | $CFCl_3$ | CFC-11, R-11, F-11 |
| Дихлородифлуорометан | $CF_2Cl_2$ | CFC-12, R-12, F-12 |
| Трихлоротрифлуороетан | $CF_2ClCFCl_2$ | CFC-113, R-113, F-113 |

CFC-11, који се користи у распршивачима спрејева, и CFC-12, који се користи у системима за рашлађивање, чине више од 50% извора хлора у атмосфери. Због свог великог времена живота и врло споре дифузије према стратосфери постоји 10-20 година временске разлике између њихове емисије у тропосферу и активне улоге у разарању озонског слоја.

| Слична једињења | хем. формула | ком. имена |
|---|---|---|
| Хидрохлорофлуорокарбонати | нпр. $CHClF_2$ | HCFC-22, R-22 |
| Угљентетрахлорид (тетрахлорметан) | $CCl_4$ | |
| Метилхлороформ (трихлороетан) | $CH_3CCl_3$ | R-140a |
| Метилхлорид (хлорометан) | $CH_3Cl$. | |

По хлорном циклусу влада се и бром. Извори брома су: халони (средства за гашење ватре) - нпр. $CF_3Br$ (Халон 1301), метилбромид (пестицид).

Постоји мноштво механизама у којима хлор уништава озон. Најједноставнији је:

$$\begin{aligned} Cl + O3 &\rightarrow ClO + O_2 \\ ClO + O &\rightarrow Cl + O_2 \\ \text{Нето:}\quad O_3 + O &\rightarrow 2O_2 \end{aligned}$$

У овом циклусу атом хлора је катализатор, тј. не троши се у реакцији. Сваки атом хлора у стратосфери може уништити на хиљаде молекула азота пре него што нестане.

Атом брома је 10-100 пута деструктивнији (јер бром, за разлику од хлора, нема стабилна једињења у која може "да се склони" - тзв. резервоаре), али на срећу, његова концентрација је око 100 пута мања у односу на хлор. Веза између антарктичког оштећења озона и емисије CFC-а је доказана, док на средњим гоеграфским ширинама ова веза је само вероватна.

**Озонска рупа** изнад Антарктика откривена је земаљским мерењима 1980.-84. године у месту Halley Bay. Термин "озонска рупа" није адекватан, јер се ради само о изразитом смањењу концентрације озона у тој области. Уочене су врло ниске вредности озонског слоја од августа до новембра; на почетку периода вредност је ниска ($< 300$ DU), а онда, уместо да полако расте када се у пролеће појави светлост, она пада на испод 150 DU и мање. У нижој стратосфери, између 15 и 20 $km$, око 95% озона је уништено; изнад 25 $km$ оштећења су мала, а као нето резултат појављује се оштећење од око 50%. У касно пролеће враћају се нормалне вредности, када топли, озоном богати, ваздух почне да струји са мањих географских ширина.

Објашњење "озонске рупе" даје тзв. PSC теорија. По овој теорији изнад пола јавља се поларни вртлог. Док се зими стратосферски ваздух хлади захвата га Кориолисова сила и успоставља јаку западну циркулацију око пола; кад се Сунце врати ветар слаби, али вртлог остаје стабилан до новембра, стварајући изолован ваздушни систем. Поларни стратосферски облаци (Polar Stratosferic Clouds -PSC) јављају се јер је поларни вртлог изузетно хладан (у нижој стратосфери чак испод -80°$C$). Компликоване хемијске реакције на PSC онемогућавају хлору да заврши у својим резервоарима; остаје у активном стању које уништава озон. Докази PSC теорије налазе се у смањеној концентрацији резервоара за време зиме и пролећа, док је у исто време изразито повећана концентрација $ClO$.

Каква су предвиђања за будућност "озонске рупе"? Може се очекивати да ће у неколико наредних година она у току године трајати дуже, али се површина коју ће она жватати неће битно повећавати. Изнад Арктика "озонска рупа", за сада, не постоји. То је због тога што је изнад њега вртлог пуно скабији, температуре су више, PSC су ређи и разбијају се раније у пролеће. Рупа се евентуално може очекивати, али значајно мања и слабија од оне на Антарктику. С обзиром да су донети међународни про-

токоли који регулишу смањење продукције CFC и других активних једињења, може се очекивати да ће овај разлог за нарушавање озонског слоја бити у знатној мери елеиминисан. Међутим, не треба сметнути с ума да појачање ефекта стаклене баште врло неповољно утиче на озонски слој, тако да прогнозе у погледу његовог опоравка данас нису потпуно оптимистичке.

**Ултра-љубичасто зрачење** обухвата електромагнетне таласе чија се таласна дужина налази у опсегу од 200-400 $nm$. У спектру електромагнетног зрачења UV зрачење се налази између видљиве светлости и x-зрака. UV светлост се може поделити на три опсега:

$$\text{UVA } (320-400\,nm), \quad \text{UVB } (280-320\,nm), \quad \text{UVC } (200-280\,nm).$$

UVA зрачење није штетно, а озонски слој га не апосрбује. UVB је штетно, а озонски слој га делимично апсорбује. UVC је смртоносно, а озонски слој га у потпуности апсорбује. Доказана је директна веза између повећаног интензитета UV зрачења и осиромашења озонског слоја. Два су основна параметра који одређују озраченост на површини Земље: пут који сунчеви зраци прелазе и стање атмосфере. Надморска висина је трећи параметар који је повезан са претходна два. Соларни угао - SZA (Solar Zenith Angle) одређује дужину пута UV зрака. Он зависи од географске ширине, доба дана и доба године, а може бити нула само за места у појасу око екватора (23.5 S-23.5 N). Интензитет UV зрачења је већи на малим географским ширинама и већим надморским висинама. Озраченост такође зависи од стања облака и атмосферских аеросола, а у случају UV зрачења и од стања озонског слоја, као и од рефлексије од површине Земље. Облаци и аеросоли расејавају, а $SO_2$ апсорбује и расејава UV. Танки облаци расејавају UV зрачење према површини Земље, а дебљи ресејавају зрачење углавном назад ка међупланетном простору.

Ефекти прекомерног озрачивања су:

- Опекотине и сунчаница
- Убрзано старење коже
- Карциноми коже (карцином базалних ћелија, карцином сквамозних ћелија, меланом)
- Алергијска осетљивост
- Слабљење имуног система
- Оштећења ока (катаракта, птиригиум, оштећења макуле)

**UV индекс** омогућује дневну прогнозу очекиваног ризика претераног излагања сунцу. Он прогнозира интезитет UV зрачења на скали од 0 до 10+, где 0 означава минимални, а 10+ врло високи ризик. Срачунавање UV индекса почиње сателицким мерењем тренутног стања озонског слоја за читаву планету, након чега се врши прогноза за следећи дан. Затим се коришћењем радијативног трансфер модела срачунава количина UV зрачења која би доспела на Земљу у опсегу таласних дужина од 290 до 400 $nm$ у тренутку минималног SZA. Тада се свака вредност интензитета на одређеној таласној дужини множи вредношћу тежинске функције (Erythema Action Spectrum), која узима у обзир биолошко дејство UV зрака. Након тога узима се у обзир стање облака и надморска висина. Коефицијент за чисто небо је 1, за растресите облаке 0.89, а за потпуно облачно небо 0.31. За сваки километар надморске висине повећање је 6%. Тако добијена вредност дели се са 25 и добија се вредност прогнозираног UV индекса.

Савети за излагање сунцу су:

- Ограничите време на подневном сунцу што је више могуће (UV је најјаче у интервалу од 10 $h$ до 16 $h$)
- Потражите обавештење о UV индексу у медијима
- Носите сунчане наочаре које заустављају 99-100% UV зрачења (стаклене наочаре)
- Носите шешир (са широким ободом)
- Потражите хладовину (када је Ваша сенка дужа од Вас - UV ниво је низак, ако је сенка краћа од Вас - потражите хладовину!)
- Заштите изложене делове тела одећом за време продуженог боравка на сунцу (памучна одећа дугих ногавица и рукава, мајице са крагном)
- Користите заштитна средства (заштитни фактор 15 и више)
- Избегавајте UV лампе и салоне за кварцовање

**Закључак.** Има ли разлога за страх? Има и нема. Морамо бити свесни да је Сунце, осим што је извор живота на Земљи, потенцијални изазивач опасних болести. Здравствена култура мора да обезбеди правилан однос према Сунцу и сунчању. Још значајније је да се однос човека према природи мора да мења, или ће, у противном, угрозити и свој опстанак.