

OZONSKA LUKNJA NAD SEVERNIM POLOM

Ozone hole above North Pole

Tanja Cegnar

Pojav ozonske luknje povezujemo z južnim zemeljskim polom, saj se že nekaj desetletij tam redno pojavlja med avgustom in novembrom. Njena velikost, trajanje in količina izginulega ozona se iz leta v leto spreminjajo predvsem v odvisnosti od meteoroloških razmer, dolgoročni trend pa je povezan z uspešnimi ukrepi mednarodne javnosti za omejitev in opustitev rabe ozonu škodljivih plinov. Nad severnim polom je pojav ozonske luknje veliko presenečenje, saj je polarni vrtinec zaradi precej bolj razgibane porazdelitve kopnega in morja nad severnim polom običajno prešibak, da bi bili izpolnjeni pogoji za intenzivno izginjanje ozona.

A letos je bilo drugače. Zanimivo sosledje dogodkov v ozračju je omogočilo nastanek največje ozonske luknje nad Arktiko. Polarni vrtinec nad severnim polom je bil tokrat zelo stabilen in kompakten, v njem se je ujel za severno poloblo nenavadno mrzel zrak, v katerem so nastali stratosferski oblaki na višini, kjer je v ozračju največja koncentracija ozona. Ultravijolični sončni žarki so ob izteku zime na severni polobli ob navzočnosti ledenih kristalčkov povzročili, da so se iz molekul plinov klorofluoroogljikovodik in hidroklorofluoroogljikovodik sprostili atomi klora in broma, ki reagirajo z ozonom in ga uničujejo.

Ozon

Ozon je brezbarven in zelo reaktiven plin, sestavljajo ga molekule treh atomov kisika. Ozon je naravna sestavina ozračja, nastaja visoko v ozračju, v plasti, ki je nad vremenskimi pojavi. Tanka plast ozona varuje življenje na zemeljskem površju pred škodljivim delom UV sončnega sevanja. Velika večina ozona v ozračju, okoli 90 %, je zbrana na višini med 10 in 50 km. Naravni ozon je rezultat ravnotežja med nastajanjem ozona pod vplivom sončnih žarkov in kemijskimi reakcijami, ki ga uničujejo. Ko sončno sevanje razdeli molekulo kisika na dva atoma kisika, se posamezen atom kisika lahko pridruži molekuli kisika in nastane molekula ozona ali pa dva posamezna atoma kisika tvorita molekulo kisika. Ozon razpada v reakcijah z molekulami, ki vsebujejo dušik, vodik, klor ali brom. Nekatere molekule, ki uničujejo ozon, so naravnega izvora, nekatere pa smo v ozračje prispevali ljudje.

Ozon najdemo tudi v spodnjih plasteh ozračja v zelo spremenljivih koncentracijah – ta ozon je predvsem sestavni del fotokemičnega smoga. Ozon nastaja iz predhodnikov ozona, ki izvirajo večinoma iz industrije in prometa. Povišane ravni ozona v zraku pri tleh povzročajo propadanje gume, škodujejo rastlinam in ljudem.

UV sončno sevanje

Sončno sevanje sestavljajo vidna svetloba, infrardeče in ultravijolično sevanje. Slednje ima valovno dolžino pod 400 nm; je nevidno in ga ne čutimo, ga pa opazimo po učinkih. Ultravijolično sončno sevanje delimo na tri območja. Valovne dolžine med 315 in 400 nm spadajo v tako imenovano območje A; ta del sevanja vzpodbuja tvorbo kožnega pigmenta, torej porjavlost kože, žal pa povzroča izgubljanje prožnosti kože in prispeva k prezgodnjemu staranju. Območje B, z valovnimi dolžinami od 280 do 315 nm, vzpodbudno vpliva na veliko življenjsko pomembnih procesov, v prevelikih dozah pa škoduje očem, povzroča opekline in kožnega raka ter slabi imunski sistem. Večji del tega sevanja vpije zaščitni ozonski plašč v ozračju že na višini med 12 in 50 km nad površjem in do tal prodre le manjši del teh žarkov. V območju C so energijsko najmočnejši žarki valovne dolžine pod 280 nm. Škodijo živim bitjem, na srečo pa ga ozračje v celoti vpije, še preden doseže zemeljsko površje.

Geografska širina, letni čas, nadmorska višina in ura določajo, koliko UV sevanja prodre do tal. Odločilno vpliva vrsta in količina oblakov, seveda pa tudi debelina zaščitnega ozonskega plašča. Ta je nekoliko tanjši v velikih območjih visokega zračnega tlaka, nekoliko debelejši pa v obsežnih območjih nizkega zračnega tlaka. Nekoliko poenostavljeno lahko povzamemo, da v odvisnosti od vremenskega tipa zaščitni ozonski plašč nudi nekoliko boljše zaščito pred UV žarki v območju, kjer je večja verjetnost za oblačno vreme, nekoliko slabšo pa v krajih z večjo verjetnostjo jasnega vremena.

Vloga zaščitne ozonske plasti

V zemeljskem ozračju ločimo več plasti, za razumevanje nastajanja in izginjanja ozona sta pomembni dve; prva, troposfera, je spodnja plast ozračja, v kateri nastaja tudi vreme in nad njo sega do višine 9 km, nad ekvatorjem do višine okoli 16 km, pri nas pa do okoli 12 km. Nad njo je plast, ki ji pravimo stratosfera in sega od vrha troposfere do višine okoli 50 km. Zaščitna ozonska plast je zbrana v stratosferi, kjer ščiti življenje na Zemlji pred škodljivim delom UV sončnega sevanja.

Ozon v stratosferi vpije večino UV sončnega sevanja. Brez zaščitne ozonske plasti bi UV-C sončno sevanje steriliziralo zemeljsko površino. Zaščitna ozonska plast nas obvaruje pred UV-C in pretežnim delom UV-B sončnega sevanja, UV-A sevanje pa v veliki večini prepušča.

Na srečo je ob koncu zime sonce nad Arktiko šele vzšlo nad obzorjem in je moč sončnih žarkov, s tem pa tudi UV sevanja, še dokaj šibka in zelo stanjšana ozonska plast visoko na severu ne predstavlja večje grožnje zdravju ljudi. Poleg tega se je ozonska luknja zadrževala visoko na severu in na srečo ni segla do gosto naseljenih območij.

Enota za količino ozona v ozračju

Zaščitni ozonski plašč ni posamezna plast v ozračju, ampak je ozon razpršen po ozračju. Zaščitna ozonska plast je območje, kjer je zbranega več ozona kot drugod v ozračju. Dobsonova enota (DU) je mera za ves ozon v stolpcu zraka. Če bi ves ozon v ozračju ohladili na 0 °C in ga stisnili v enotno plast na morski gladini pri zračnem tlaku 1013,25 mb, bi bila plast ozona v povprečju na svetovni ravni debela le okoli 3 mm oz. 300 DU. Značilne vrednosti so med 200 in 500 DU, manjše vrednosti navadno srečujemo v tropskem pasu, višje pa na polarnih območjih. Čeprav je ozona zelo malo, ima za življenje na Zemlji zelo pomembno vlogo.

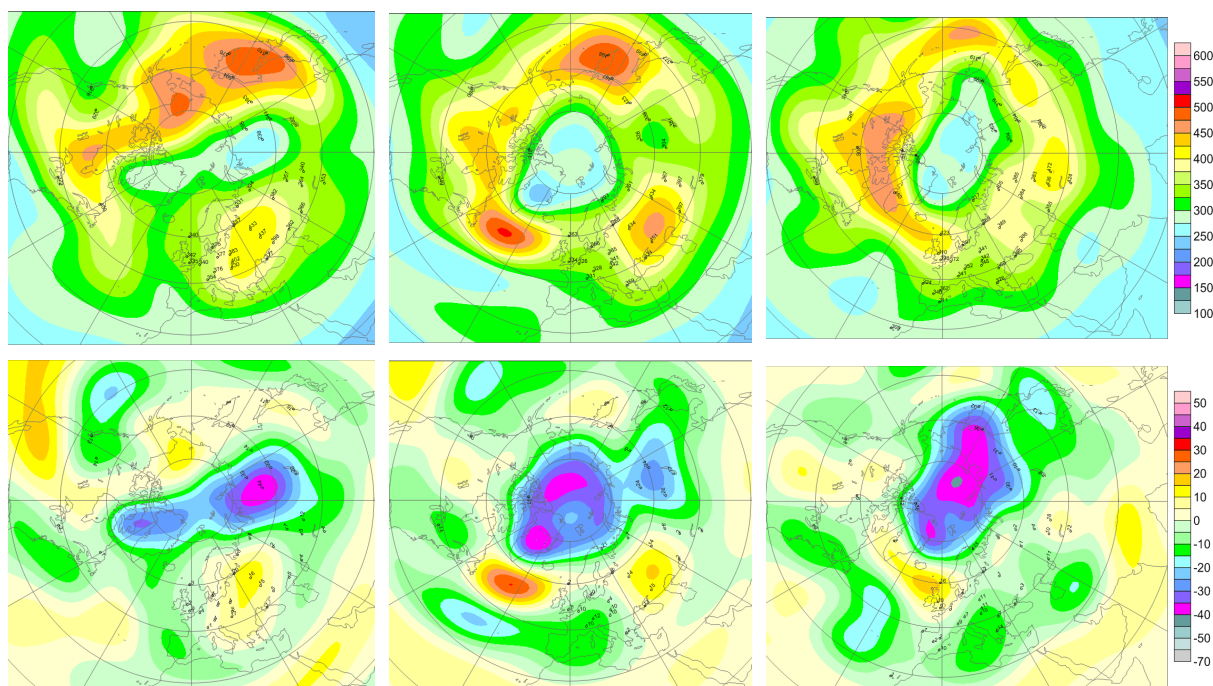
Ozonska luknja

Razporeditev ozona v ozračju je odvisna od nadmorske višine, zemljepisne širine in letnega časa. Največ ozona nastane v stratosferi v pasu okoli ekvatorja, gibanje zraka pa ga nato razporedi nad ostale kraje in ga počasi zbira nad poloma. V stratosferi nad poloma pozimi nastane polarni vrtinec – rahlo valovito kroženje zraka, ki je nad južnim polom bolj izrazito kot nad severnim. Polarni vrtinec preprečuje oz. ovira mešanje zraka nad polom z zrakom bližje ekvatorju, zato nad polom pozimi nastanejo posebne temperaturne razmere. Ker polov pozimi več mesecev ne obsije sonce, temperatura v stratosferi pade celo pod -80 °C.

Ozonska luknja se že nekaj desetletij redno razvija nad Antarktiko, kjer ob koncu zime in na začetku pomladi ozon na višini med 14 in 21 km skoraj povsem izgine. Tudi nad severno poloblo se marca in aprila ozonska plast nad severnim polom stanjša, vendar skoraj vedno bistveno manj kot nad južnim polom. Na območju okoli ekvatorja je trend upadanja koncentracije ozona zelo majhen ali povsem odsoten.

Ljudje z industrijsko dejavnostjo motimo ravnotežje in spreminjamo kemično sestavo ozračja. Politiki so zato konec leta 1987 sprejeli Montrealski protokol, s katerim so predpisali stopnjo omejevanja proizvodnje in uporabe ozonu nevarnih snovi. Kasneje so konvencijo dopolnili in ukrepe še poostрили.

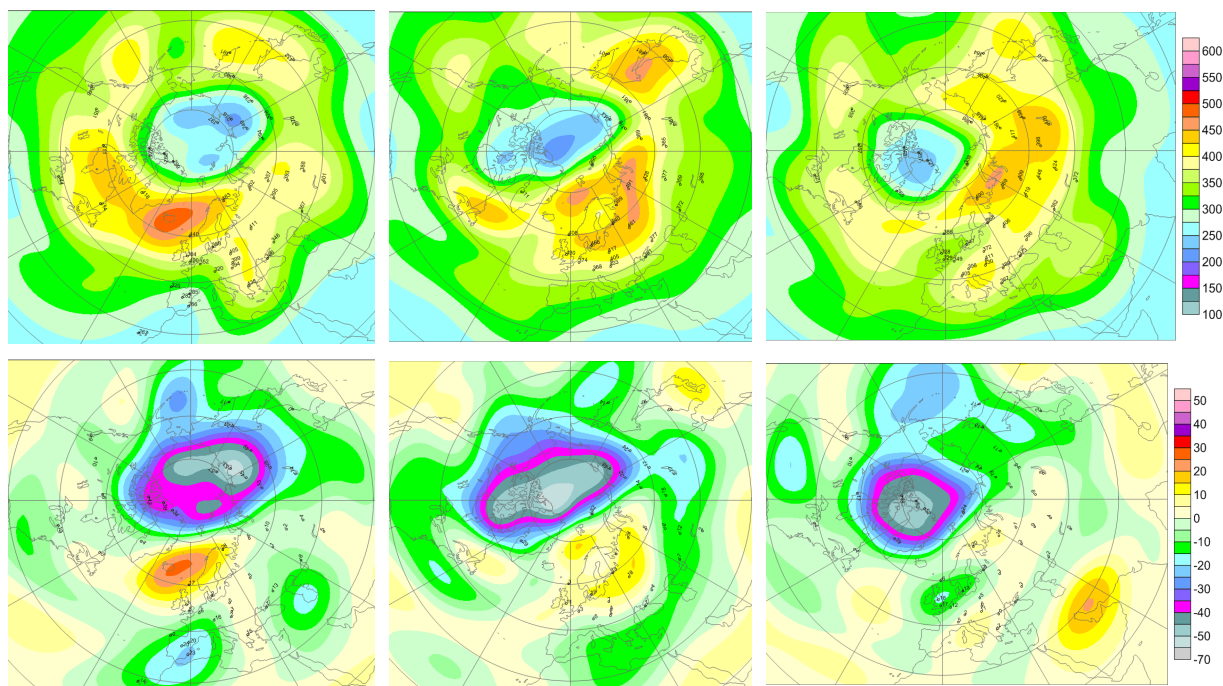
Ker je vsebnost ozonu škodljivih snovi v ozračju dosegla višek okoli leta 1994, pričakujemo, da si bo ozonska plast v naslednjih letih in desetletjih povsem opomogla. Ozonska luknja se bo kljub ukrepom najverjetneje še kar nekaj časa pojavljala, saj imajo freoni dolgo življenjsko dobo, nekateri celo daljšo od sto let. Ob izdelanih analizah razsežnosti in uničenega ozona nad Antarktiko v letu 2019 so znanstveniki z zadovoljstvom ugotovili, da ob uspešnem prizadevanju mednarodne skupnosti za zmanjšanje oz. opustitev rabe ozonu škodljivih snovi razmere nad Antarktiko kažejo pozitiven trend obnavljanja ozonske plasti in ozonska luknja nad južnim polom počasi in z velikimi medletnimi nihanji izzveneva, popolno okrevanje pa lahko pričakujemo za prvo ali drugo desetletje druge polovice tega stoletja. Popolno okrevanje zaščitne ozonske plasti nad severnim polom so napovedovali že za sredino tega stoletja. Razlike v razvoju ozonske luknje v posameznih letih so posledica različnih meteoroloških razmer, kar se je ponovno dokazalo letos nad severnim polom.



Slika 1. Celotna debelina ozonske plasti v ozračju 5., 15. in 25. februarja 2020 v DU (zgornja vrstica) ter odklon debeline ozonske plasti od dolgoletnega povprečja v % (spodnja vrstica); povzeto po Kanadski agenciji za okolje Figure 1. Total ozone on 5, 15 and 25 February 2020 in DU (upper row) and deviations from the normals in % (lower row); Source: Environment Canada

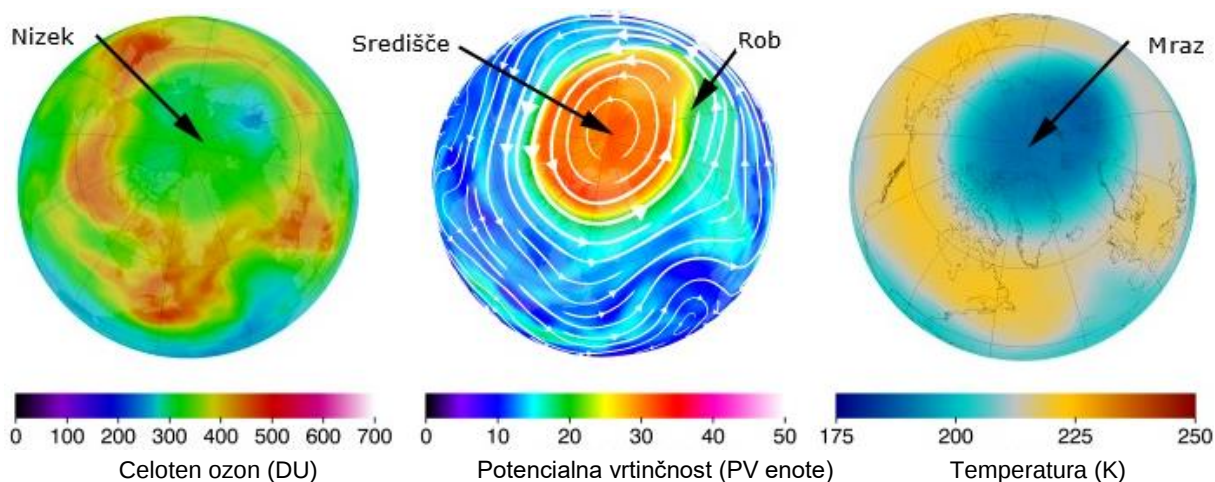
Ozonska luknja nad Arktiko

Vsa leta doslej smo bili veliko bolj zaskrbljeni zaradi ozonske luknje nad Antarktiko kot nad manj izrazitim pojavom tanjšanja ozonske plasti nad Arktiko. Pojav ozonske luknje nad severnim polom leta 2011 je sicer opozoril, da so meteorološke razmere odločilne, a zadovoljstvo nad uspešno omejitvijo uporabe ozonu škodljivih snovi in ugoden trend razmer nad južnim polom sta delovala pomirjujoče. V pomladnih mesecih se tudi na severni polobli arktična ozonska plast nagiba k redčenju, a povprečna zimska temperatura ozračja nad Arktiko je navadno višja kot nad Antarktiko. Zato je razvoj dovolj stabilnega in kompaktnega polarnega vrtnica, v katerem bi temperatura padla dovolj nizko, da bi sprožila intenzivno izginjanje ozona, malo verjeten. A prav to se je začelo dogajati februarja 2020 in ozonska luknja nad Arktiko je vztrajala marca in aprila. Letošnji pojav izrazitega upada ozona nad severnim polom je bil veliko presenečenje.



Slika 2. Celotna debelina ozonske plasti v ozračju 5., 15. in 25. marca 2020 v DU (zgornja vrstica) ter odklon debeline ozonske plasti od dolgoletnega povprečja v % (spodnja vrstica); povzeto po Kanadski agenciji za okolje
Figure 2. Total ozone on 5, 15 and 25 March 2020 in DU (upper row) and deviations from the normals in % (lower row); Source: Environment Canada

Polarni vrtnec



Slika 3. Shematski prikaz vsega ozona, potencialne vrtničnosti na ploskvi 460 K potencialne temperature in temperature na 50 mb ploskvi nad Arktiko 22. februarja 2011, vir: NASA, Goddard Space Flight Center, https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/vortex_NH.html

Figure 3. Northern hemisphere total column ozone, potential vorticity on the 460 K potential temperature surface, and temperature on the 50 hPa pressure surface for 22 February 2011. The white lines with arrows on the PV image are streamlines, where the thickness of the streamlines and the size of the arrows indicate the strength of the local flow. Source: NASA, Goddard Space Flight Center, https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/vortex_NH.html

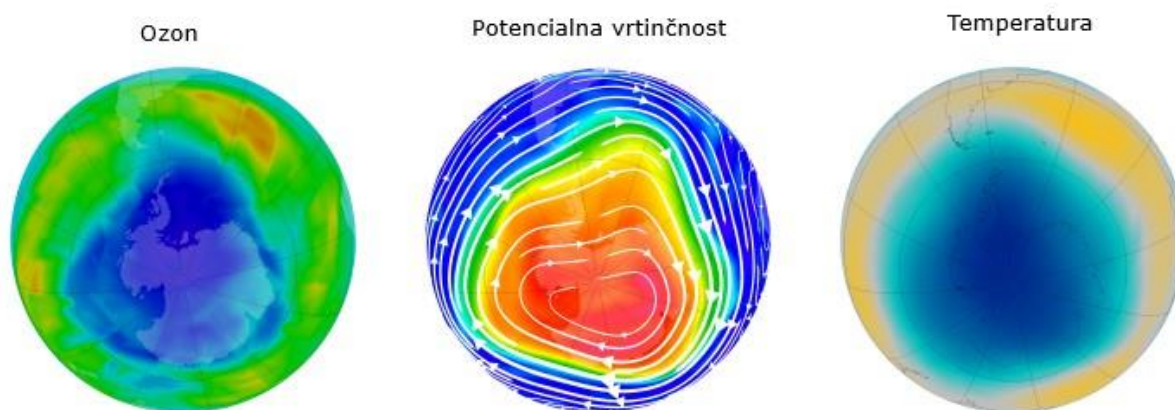
Polarni vrtnec je območje v stratosferi, ki ga omejuje močan vetrovni stržen, ki obkroža polarno območje. Vrtinec se začne krepiti jeseni, ko se hitrost vetra poveča, in razpade, ko veter spomladi oslabi. Polarni vrtnec sega od tropopavze skozi stratosfero in v mezosfero (nad 50 km visoko). Znotraj vrtinca

je enotna zračna masa, ki je občutno hladnejša in se po kemični sestavi nekoliko razlikuje od zračne mase v zmernih geografskih širinah. Nad južnim polom je polarni vrtnec kompakten in obstojen, skoraj vedno ima središče nad južnim polom in navadno vztraja do novembra ali decembra. Od polarnega vrtnca je odvisna porazdelitev ozona in temperature v stratosferi nad poloma. Ko ob koncu zime sonce nad polarnim območjem vzide, začne ozon vpijati sončne žarke in ogrevati polarno stratosfero.

Nenadno stratosfersko ogrevanje je velika sprememba vremenskega vzorca. V približno tednu dni se temperatura v spodnji stratosferi nad severnim polom lahko dvigne celo za več kot 50 °C. Ogrevanje je posledica velikih planetarnih valov, ki se razširjajo navzgor iz troposfere. Z ogrevanjem je povezana sprememba zgradbe polarnega vrtnca. Vrtnec se lahko premakne s pola ali se razdeli na dva dela. Polarno območje se ob tem ogreje zaradi prodora zraka z zmernih geografskih širin in zaradi spuščanja zračne mase. Zadnje ogrevanje v hladnem delu leta je označeno za končno ogrevanje, polarni vrtnec razpade in se razgradi, navadno se to na severni polobli zgodi marca ali aprila. Včasih pa si polarni vrtnec po večji epizodi ogrevanja sredi zime v januarju ali februarju ne opomore.

Stratosferska ogrevanja prispevajo k zvišanju ravni ozona in temperature nad polarnim območjem. Šibka startosferska ogrevanja se nad severnim polom zgodijo večkrat v zimski sezoni, izrazita polarna ogrevanja se v povprečju zgodijo le vsako drugo hladno sezono.

Polarni vrtnec nad severnim polom se navadno razgradi marca ali zgodaj aprila, vendar se lahko to zgodi že februarja ali šele zgodaj maja. Polarni vrtnec nad južnim polom je bolj obstojen, navadno se razgradi novembra ali sredi decembra.



Slika 4. Shematski prikaz vsega ozona, potencialne vrtničnosti na ploskvi 460 K potencialne temperature in temperature na 50 mb ploskvi nad Antarktiko 22. avgusta 2011, vir: NASA, Goddard Space Flight Center, https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/vortex_NH.html

Figure 4. Southern hemisphere total ozone, potential vorticity on the 460 K potential temperature surface, and temperature on the 50 hPa pressure surface for 22 August 2011. Source: NASA, Goddard Space Flight Center, https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/vortex_NH.html

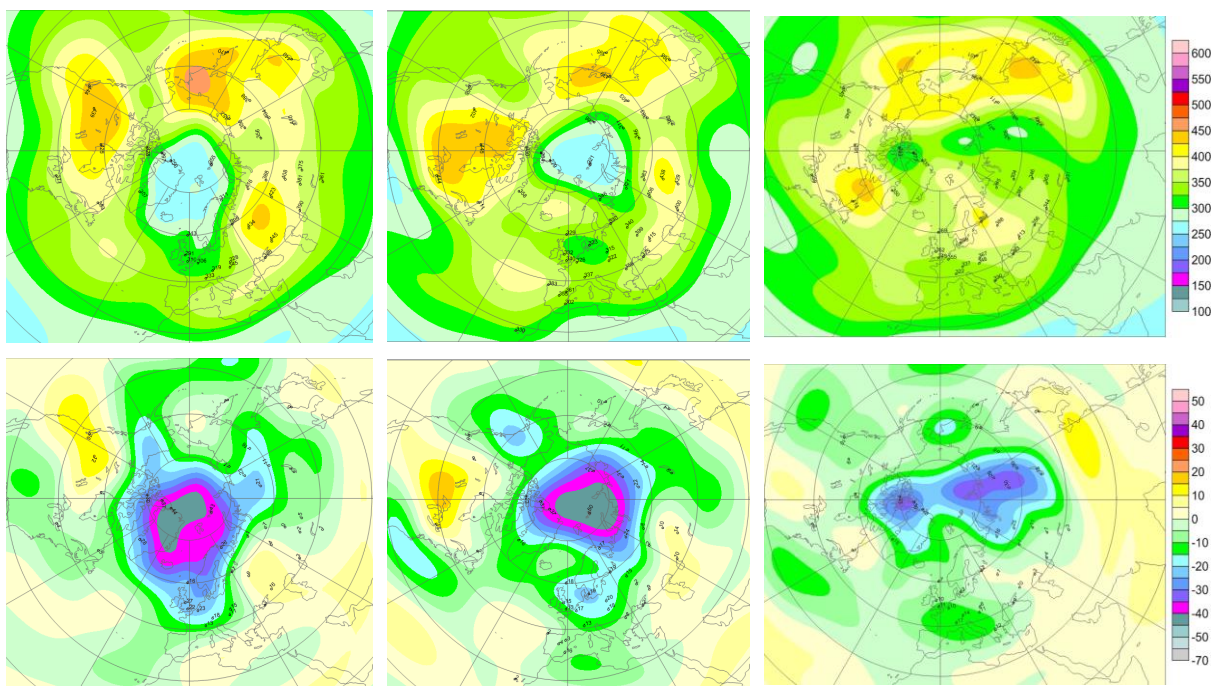
Ozonska luknja v preteklosti

Zmanjšanje ozona v ozračju nad Antarktiko so opazili že leta 1975, vendar so podatke o tem prvič objavili šele leta 1985, ko so ugotovili, da se oktobra in novembra količina ozona nad Antarktiko iz leta v leto bolj znižuje. Satelitske meritve so pokazale, da je območje izrazitega redčenja ostro omejeno, zato so pojav poimenovali ozonska luknja.

Sprva so mislili, da stratosfero onesnažujejo predvsem reaktivna letala, ki med drugim proizvajajo ozonu škodljive dušikove okside. Kasneje so ugotovili, da so glavni krivci za razpad ozona atomi klora in broma. V polarnem vrtnicu ob prisotnosti stratosferskih oblakov pri temperaturah okoli -80 °C lahko en sam atom klora uniči več tisoč molekul ozona. Uveljavila se je splošno privzeta razlaga, da so za

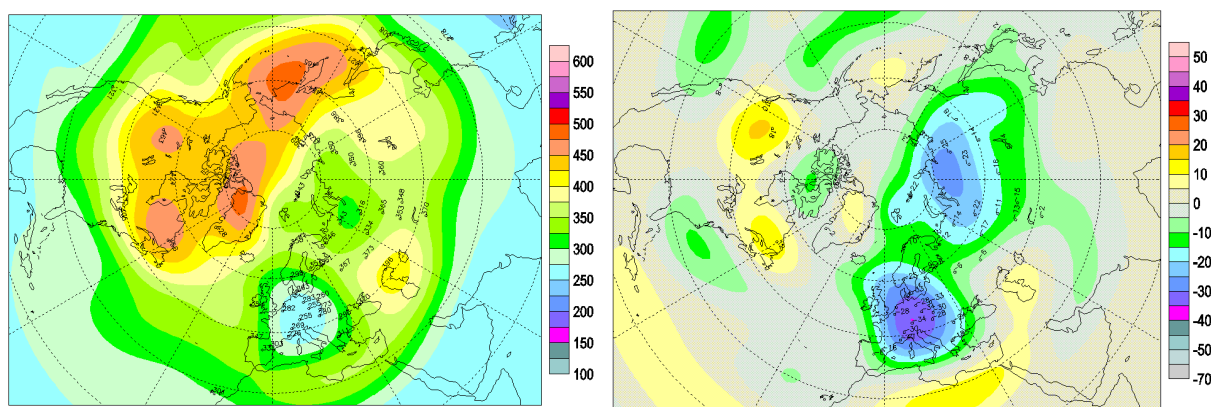
izginjanje ozonskega plašča krivi plini, ki smo jih proizvajali ljudje. Najpogostejše so to ogljikovodiki, ki vsebujejo klor ali brom. Uporabljali smo jih za potisne pline v sprejih, hladilnikih, plastičnih masah, topilih, za gašenje požarov ipd.

Prvič smo bili ozonski luknji nad severnim polom priča marca in aprila 1997 in nato leta 2011, takrat se je vsebnost ozona nad Arktiko znižala za približno 40 %. Od takrat smo sicer še opazili pojav mini ozonske luknje, vendar nikoli v obsegu, ki bi bil po trajanju in obsegu primerljiv z razmerami spomladi 2011. Letošnja ozonska luknja Arktiko je presegla tisto iz leta 2011. Nedvomno je to veliko negativno presenečenje za mednarodno strokovno in laično javnost.



Slika 5. Celotna debelina ozonske plasti v ozračju 5., 15. in 25. aprila 2020 v DU (zgornja vrstica) ter odklon debeline ozonske plasti od dolgoletnega povprečja v % (spodnja vrstica); povzeto po Kanadski agenciji za okolje
Figure 5. Total ozone on 5, 15 and 25 April 2020 in DU (upper row) and deviations from the normals in % (lower row); Source: Environment Canada

Mini ozonska luknja



Slika 6. Celotna debelina ozonske plasti v ozračju 17. marca 2014 v DU (levo) ter odklon debeline ozonske plasti od dolgoletnega povprečja v % (desno); povzeto po Kanadski agenciji za okolje
Figure 6. Total ozone on 17 March 2014 in DU (left) and deviations from the normals in % (right); Source: Environment Canada

Mini ozonska luknja je krajevno in časovno omejena oslabitev zaščitne ozonske plasti. Največkrat se pojavlja v zmernih geografskih širinah in višje proti polarnemu območju. V mini ozonski luknji ozon ni uničen na način, kot se to dogaja v ozonski luknji nad polom, ampak je posledica tako vodoravnega kot navpičnega gibanja v ozračju. Večinoma spremljajo mini ozonske luknje določen vremenski sistem in se pojavljajo od pozne jeseni do zgodnje pomladi. Pojav izrazite mini ozonske luknje smo zasledili nad srednjo Evropo marca 2014.

UV indeks

Moč sončnega, in s tem tudi UV dela sončnega sevanja, se tekom dneva spreminja, objavljamo le največjo dnevno vrednost ob jasnem vremenu. Če je nebo oblačno, je vrednost temu primerno nižja. Ob jasnem nebu je v topli polovici leta moč UV sončnega sevanja največja ob enih popoldne po poletnem času, takrat je sonce najvišje nad obzorjem.

Pozimi je UV sevanje v povprečju desetkrat šibkejše kot poleti. Ob običajni debelini zaščitnega ozonskega plašča junija in v začetku julija je pri nas UV indeks ob jasnem vremenu sredi dneva po nižinah 9, v gorah pa 10, saj je v gorah ultravijolično sončno sevanje močnejše kot v nižini. Izjemoma lahko v posameznih dnevih, ko je ozonski plašč nad našimi kraji nekoliko stanjšal, UV indeks v visokogorju seže do 12, po nižinah pa med 10 in 11.

Pri nas uporabljamo napovedi UV indeksa, ki jih računa Nemška meteorološka služba za vse evropske meteorološke službe. Sicer pa je na svetovnem spletu dosegljivih več virov UV indeksa, vendar večina med njimi ne upošteva dnevnih oz. nekajdnevnih sprememb debeline ozonskega plašča, ki pomembno vplivajo na moč UV sončnih žarkov pri tleh. Napovedi UV indeksa in celotne debeline ozonske plasti objavlja tudi Evropski center za srednjeročne vremenske napovedi v okviru programa Copernicus Ozračje (CAMS), ki je namenjen spremljanju onesnaženja ozračja, sončni energiji, toplogrednim plinom in sevalni bilanci ozračja (<https://atmosphere.copernicus.eu/charts/cams/>).

Na spletnih straneh Agenciji za okolje UV indeks objavljamo dnevno. Najdete ga v sklopu biovremenskih napovedi. Ker je vrsta in količina oblakov med težje napovedljivimi elemneti vremena ter se lahko hitro spreminja, objavljamo vrednosti UV indeksa za jasno nebo.

UV indeks povezuje energijski tok UV sončnega sevanja z občutljivostjo kože. Je polurno povprečje energijskega toka z valovno dolžino pod 400 nm, s tem da spekter utežimo z občutljivostjo kože za različne valovne dolžine. Tako dobljeno vrednost pomnožimo s faktorjem, da dobimo rezultat v razponu od 0 do 16. Najvišje vrednosti UV indeksa so v tropskem pasu in visokogorju. Po občutljivosti na sončne žarke ločimo kar nekaj tipov kože. Za določanje UV indeksa upoštevamo povprečno občutljivost bele kože. Kožo tipa I in II sonce vedno opeče, tip I nikoli ne porjavi, tip II pa le redko. Tip III sonce sicer lahko opeče, vendar taka koža lahko porjavi. Tip IV redko dobi sončne opekline in razmeroma hitro porjavi. Tip V in VI sta naravno temnejša tipa kože, značilna za Južnoevropejce in temnopolte ljudi, sonce tako kožo le izjemoma opeče. Črna koža je približno desetkrat odpornejša na sončne žarke kot bela. Še posebej občutljiva je koža dojenčkov, zato moramo biti pri njihovem izpostavljanju soncu izjemno previdni.

SUMMARY

The protective layer of stratospheric ozone over the Arctic reached a record low over the March and April 2020 due to abnormally strong polar vortex.