

PRODOR STRATOSFERSKOG OZONA U DONJE SLOJEVE ATMOSFERE

Zvezdana Bencetić Klaić¹

Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb

Sažetak. Atmosferska strujanja približno su horizontalna. Stoga se zrak iz različitih slojeva atmosfere miješa samo u posebnim, za to pogodnim meteorološkim uvjetima. Događaj u kojem zrak iz stratosfere prodire u troposferu nazivamo stratosferska intruzija. Stratosferskoj intruziji u umjerenim zemljopisnim širinama pogoduje postojanje mlazne struje u gornjoj troposferi. Zrak stratosferskog porijekla, koji prodre u troposferu, od okolnog zraka se razlikuje po visokoj koncentraciji ozona, maloj relativnoj vlažnosti i velikoj potencijalnoj vrtložnosti. Stratosferska intruzija, koju ćemo ovdje opisati, dogodila se u Zagrebu 6. veljače 1990. godine.

Zašto su atmosferska strujanja približno horizontalna?

Na česti zraka, koje se nalaze u Zemljinoj atmosferi, djeluju tri sile: **sila teža, sila gradijenta tlaka** i **Coriolisova sila**. Odnos tih sila u atmosferi je takav da su strujanja zraka približno horizontalna. Da to ilustriramo, promatrat ćemo zasebno horizontalnu i vertikalnu komponentu svake od sila.

Sila teža je rezultanta gravitacijske sile, kojom Zemlja privlači druga tijela i centrifugalne sile, koja postoji zbog rotacije Zemlje i njene atmosfere. Sila teža približno je usmjerena prema središtu Zemlje. Taj smjer nazivamo vertikalna. Prema tome, sila teža ima samo vertikalnu komponentu.

Sila gradijenta tlaka postoji u atmosferi zbog toga što je tlak zraka u različitim točkama različit. Do razlika u tlaku duž horizontale dolazi zbog toga što su ekvatorijalna područja neprestano toplija, dakle zrak u njima je rjeđi, a tlak pri tlu niži. Suprotno tome, polarna područja stalno su hladnija, te je zrak u njima gušći, a tlak pri tlu viši. Zbog toga uvijek postoji horizontalna komponenta sile gradijenta tlaka, koja nastoji gušći zrak prenijeti u područje rjeđeg zraka. Drugim riječima, horizontalna komponenta sile gradijenta tlaka nastoji dokinuti postojeće razlike (gradijente) tlaka duž horizontale.

Zbog djelovanja sile teže, koja privlači atmosferu prema Zemljinoj površini, tlak zraka opada s visinom. Stoga i duž vertikale postoji gradijent tlaka. Taj gradijent je po svom iznosu puno veći (i do 10^4 puta) od prosječnih horizontalnih gradijenata. Zbog vertikalnog gradijenta tlaka javlja se vertikalna komponenta sile gradijenta tlaka. Ona nastoji dokinuti razlike u tlaku, odnosno želi prenijeti gušći zrak vertikalno uvis u područje rjeđeg zraka. Međutim, vertikalna komponenta sile gradijenta tlaka po svom je iznosu gotovo potpuno jednaka sili teži, koja nastoji zrak prenijeti vertikalno prema dolje. Prema tome sila gradijenta tlaka i sila teža duž vertikale približno su uravnotežene. Ravnotežu vertikalne komponente sile gradijenta tlaka i sile teže nazivamo **hidrostatska ravnoteža**. Kako se atmosfera približno nalazi u hidrostatskoj ravnoteži, to su vertikalne brzine zraka u prosjeku oko sto puta manje od horizontalnih unatoč vrlo velikim postojećim vertikalnim gradijentima tlaka.

¹ zklaic@rudjer.irb.hr

Coriolisova sila postoji zbog rotacije Zemlje i njene atmosfere, a djeluje samo na tijela koja se gibaju. Ona ovisi o zemljopisnoj širini i brzini gibanja tijela. Veća je pri većim brzinama, odnosno na većim zemljopisnim širinama. Atmosferske brzine su takve da je vertikalna komponenta Coriolisove sile po svom iznosu oko 10^4 puta manja i od sile teže i od vertikalne komponente sile gradijenta tlaka, pa njeno djelovanje možemo zanemariti. Za razliku od toga, horizontalna komponenta Coriolisove sile bitno utječe na atmosferska gibanja.

Gledajući atmosferu nad većim područjem (promjera 1000 km ili većeg), horizontalna komponenta sile gradijenta tlaka približno je uravnotežena s horizontalnom komponentom Coriolisove sile. Ravnotežu horizontalne komponente sile gradijenta tlaka i Coriolisove sile nazivamo **geostrofička ravnoteža**, a horizontalno strujanje koje tada postoji nazivamo geostrofičko strujanje. To strujanje je pravocrtno i nema ubrzanja (akceleracije), a brzine su reda veličine 10 m s^{-1} . Što je horizontalni gradijent tlaka veći, to su i geostrofičke brzine veće, a strujnice su međusobno bliže. Atmosfera se približno nalazi u geostrofičkoj ravnoteži, pa su prosječne horizontalne akceleracije male.

Kako to utječe na vertikalnu strukturu atmosfere?

Zbog približno uspostavljene ravnoteže sila, gibanje zraka, ako ga promatramo nad većim područjem, približno je horizontalno. Kako ravnoteža sila nije potpuno postignuta, u pojedinim manjim područjima povremeno mogu postojati snažna uzlazna ili silazna gibanja. Međutim, nad područjem veličine poput Europe, prosječne horizontalne brzine su puno veće od vertikalnih. To znači da su, gledajući atmosferu u cjelini, prijenos i miješanje zraka duž horizontale puno intenzivniji nego duž vertikale. Stoga se atmosfera sastoji od dobro definiranih slojeva različitih osobina, koji se međusobno slabo miješaju.

Vertikalna struktura atmosfere

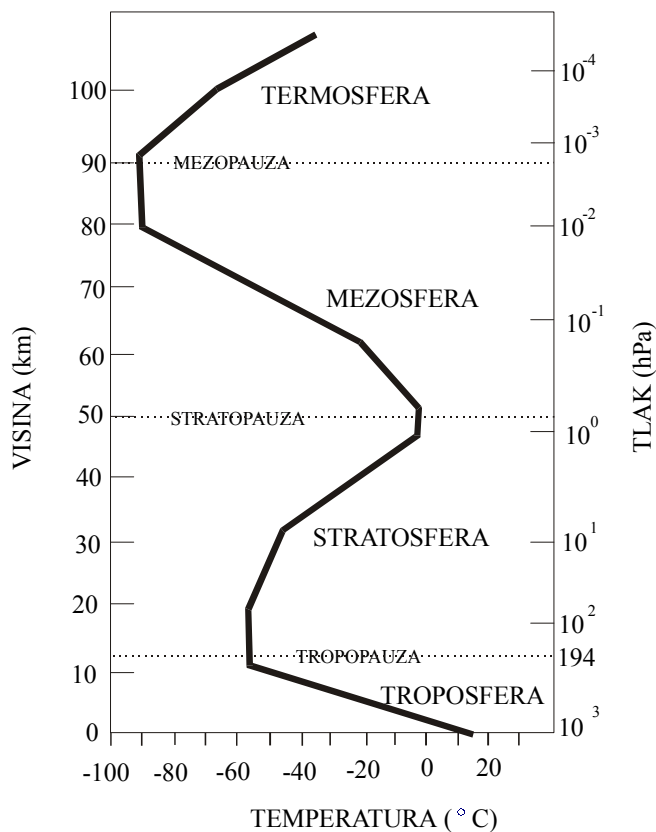
Atmosfera je plinoviti omotač sačinjen od smjese plinova (tablica 1), koji obavija naš planet. Naziv atmosfera potječe od grčke riječi *atmosfaira* (ατμόσφαιρα), gdje *atmos* (ατμός) znači para, a *sfaira* (σφαίρα) kugla. Dok neki planeti nemaju atmosfere, Venera na primjer ima gustu, a Mars vrlo rijetku atmosferu u usporedbi sa Zemljom.

Masa naše atmosfere iznosi $6 \cdot 10^{18} \text{ kg}$, dok je masa Zemlje milijun puta veća. Kako masu atmosfere privlači sila teža, to se oko 50 % mase atmosfere nalazi u prvih 5 km visine, 75 % u prvih 10 km, a čak 90 % mase u prvih 20 km visine. Na oko 500 km nad tlom zrak je toliko rijedak da se u jednom kubičnom metru nalazi svega nekoliko molekula. Pokoja molekula može se naći i do 1000 km visine. Stoga su za meteorologiju najvažniji oni fizikalni procesi koji se događaju u najdonjem dijelu atmosfere.

S obzirom na promjenu temperature s visinom, atmosferu dijelimo na četiri sloja (slika 1). To su troposfera, stratosfera, mezosfera i termosfera. Kako se u troposferi i stratosferi nalazi gotovo sva masa atmosfere, ovdje ćemo promatrati samo ta dva sloja. Detaljnije ćemo se pozabaviti posebnim slučajem u kojem stratosferski zrak u umjerenim zemljopisnim širinama prodire duboko u troposferu.

Tablica 1 Sastav čistog zraka u prvih 80-ak km atmosfere.

plin			molekularna masa	volumni udio (%)	maseni udio (%)	boravak u atmosferi
gotovo konstantan omjer	O ₂	Kisik	32.00	20.95	23.1	5·10 ³ god.
	N ₂	Dušik	28.01	78.09	75.5	10 ⁶ god.
	Ar	Argon	39.95	0.93	1.3	
	Ne	Neon	20.18	1.8·10 ⁻³	1.3·10 ⁻³	
	He	Helij	4.01	5.2·10 ⁻⁴	7.2·10 ⁻⁵	10 ⁷ god.
	Kr	Kripton	83.80	1.1·10 ⁻⁴	3.3·10 ⁻⁴	
	Xe	Ksenon	131.30	8.6·10 ⁻⁶	3.9·10 ⁻⁵	
	Rn	Radon	222.00	6.0·10 ⁻¹⁸		
promjenjiv omjeru	CO ₂	ugljkov dioksid	44.01	3.6·10 ⁻²	4.6·10 ⁻²	5-6 god.
	CH ₄	Metan	16.04	1.4·10 ⁻⁴	7.8·10 ⁻⁵	4-7 god.
	H ₂	Vodik	2.01	5·10 ⁻⁵	3.5·10 ⁻⁶	6-8 god.
	N ₂ O	Dušikov oksid	44.01	1·10 ⁻⁷	3.1·10 ⁻⁷	25 god.
	O ₃	Ozon	48.00	2·10 ⁻⁶	6·10 ⁻⁶	10 god
Jako promjenjiv omjer	H ₂ O	Vodena para	18.02	≤ 4.0		10 dana
	CO	ugljkov monoksid	28.01	1·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	0.2-0.5 god.
	NO ₂	Dušikov dioksid	46.01	2.3-3.5·10 ⁻⁵		8-10 dana
	NH ₃	amonijak	17.03	1·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁶	5 dana
	SO ₂	sumporov dioksid	64.06	2·10 ⁻⁸	9·10 ⁻⁸	2 dana
	H ₂ S	sumporovodik	34.08	≤ 0.6·10 ⁻⁷		0.5 dana
		organski ugljik (bez CH ₄ i halogenouljika)				2 dana



Slika 1. Podjela atmosfere na slojeve na temelju prosječnih promjena temperature s visinom u prvih stotinjak km atmosfere.

Razlike između troposfere i stratosfere

Postoji više razlika između troposfere i stratosfere. Na temelju njih možemo ustanoviti da li neka čest zraka ima troposferska ili stratosferska obilježja. Neke od razlika uzrokovane su razlikama u kemijskom sastavu, a druge razlikama u vrijednostima složenih fizikalnih veličina. S obzirom na kemijski sastav, troposfera i stratosfera se između ostalog razlikuju po prisustvu ozona i vodene pare. S obzirom na fizikalne veličine, ta dva sloja između ostalog možemo razlikovati prema vrijednostima veličine koju nazivamo potencijalna vrtložnost.

Ozon

Premda je količina ozona u usporedbi s drugim sastojcima atmosfere relativno mala (vidi tablicu 1), njegova važnost za život na Zemlji je ogromna. Ozon je jedini atmosferski sastojak koji upija (apsorbira) ultraljubičasto (UV) Sunčevo zračenje valnih duljina u rasponu od 240 do 290 nm. Kada bi to zračenje došlo do Zemljine površine, oštetilo bi genetički materijal, a fotosinteza, koja je neophodna za biljni svijet, bila bi onemogućena.

U čistoj troposferi ima vrlo malo ozona. Ozon se u većim količinama može naći samo pri tlu (u približno 1 do 2 km nad tlom) i to ako je zrak onečišćen ispušnim plinovima. Takvo onečišćenje postoji u velikim gradovima sa suhom i sunčanom klimom te gustim prometom, poput Rima, Atene ili Los Angelesa, a naziva se **fotokemijski smog**. Prema tome, ozon u troposferi nije poželjan, već je znak njenog onečišćenja.

Za razliku od troposfere, stratosfera je bogata ozonom. Gotovo sav atmosferski ozon nalazi se upravo u stratosferi. Stratosferski ozon, upijajući gotovo svo štetno Sunčevo

zračenje štiti život na Zemlji. Istovremeno, stratosfera se pri apsorpciji UV zračenja zagrijava. Stoga je ozon prirodan i koristan sastojak stratosfere, a njegov manjak, koji je poznat pod nazivom **ozonska rupa**, znak je narušenog sastava stratosfere.

Vodena para

Vodena para u atmosferu dospijeva isparavanjem s vodenih površina (mora, jezera i rijeka) te isparavanjem vlažnog tla. Količina vodene pare u zraku jako se mijenja i prostorno i vremenski, a s visinom opada, tako da se gotovo sva vodena para nalazi u troposferi. Stratosferski zrak razlikovat ćemo od troposferskog po izrazitoj suhoći. Vodena para dobro apsorbira dugovalno zračenje, kojim zrači Zemlja. Dugovalno zračenje još nazivamo toplinsko ili infracrveno (IC) zračenje.

Kemijski sastav pojedinih slojeva atmosfere utječe na temperaturu tih slojeva. Kako se troposfera i stratosfera razlikuju po prisutnosti ozona i vodene pare, to se i temperatura u ta dva sloja različito ponaša. U troposferi nema ozona, pa je apsorpcija Sunčevog (kratkovalnog) zračenja slaba. Istovremeno, troposferska vodena para dobro upija energiju Zemljinog dugovalnog zračenja. Drugim riječima, troposfera se najvećim dijelom grije zbog Zemljinog toplinskog zračenja. Stoga temperatura u troposferi opada s udaljenošću od Zemljine površine, kao što prikazuje slika 1. Za razliku od toga, stratosfera se najviše grije zbog energije kratkovalnog Sunčevog zračenja, koju upija ozon. Stoga temperatura u stratosferi raste s visinom, budući da u višim slojevima stratosfere ima više Sunčevog zračenja raspoloživo za apsorpciju.

Potencijalna vrtložnost

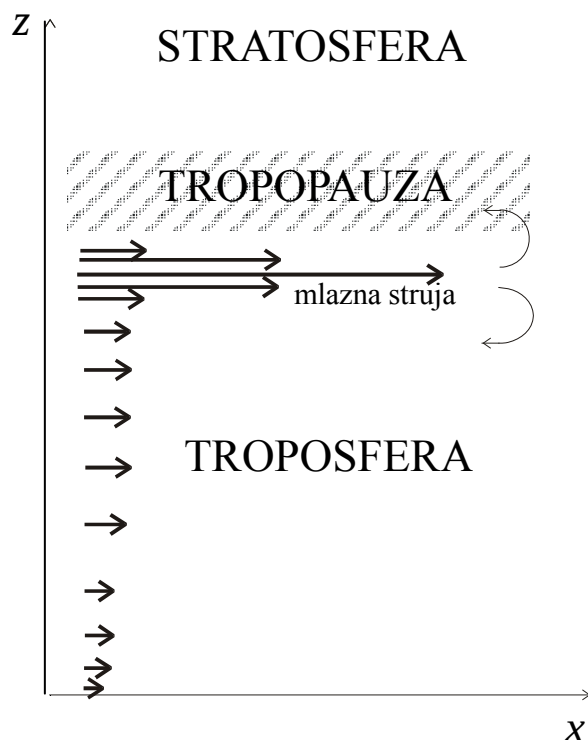
Potencijalna vrtložnost je složena fizikalna veličina koja ovisi o više atmosferskih varijabli te o njihovim prostornim promjenama, a opisuje je nelinearna diferencijalna funkcija. Potencijalna vrtložnost se ne može mjeriti. Nadalje, zbog nelinearnosti diferencijalne funkcije, potencijalnu vrtložnost u nekoj točki ne možemo točno (analitički) izračunati. Međutim, možemo je približno izračunati numeričkim metodama iz polja tlaka, polja brzine i polja temperature. Takvi proračuni temelje se na numeričkom rješavanju niza parcijalnih diferencijalnih nelinearnih jednadžbi koje opisuju atmosferske procese, a nazivamo ih numerički modeli. Upotreba numeričkih modela u meteorologiji je uobičajena, a za to su neophodna računala. Numerički proračuni potencijalne vrtložnosti pokazali su da su njene vrijednosti u stratosferi od 10 do 100 puta veće od vrijednosti u troposferi.

Kada stratosferski zrak može u umjerenim širinama prodrijeti u troposferu?

Kako su atmosferska strujanja gotovo horizontalna, prodiranje stratosferskog zraka u troposferu, koje nazivamo **stratosferska intruzija**, događa se samo ako postoje za to pogodni atmosferski uvjeti. Ti uvjeti ne postoje ni uvijek niti svuda, stoga se stratosferska intruzija događa samo povremeno i to samo u pojedinim područjima.

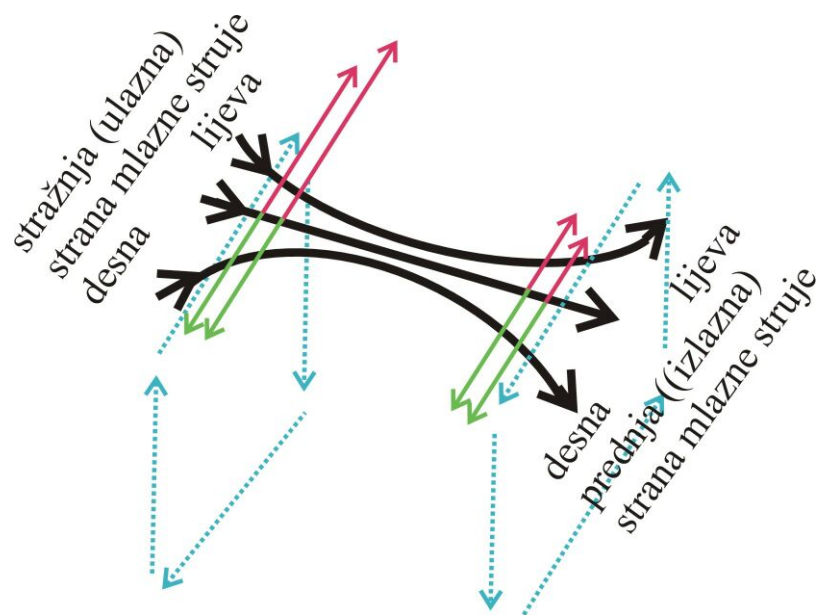
Do stratosferske intruzije može doći na nekoliko načina. Ovdje ćemo promatrati intruziju koja se javlja u umjerenim zemljopisnim širinama zbog postojanja **mlazne struje**. Mlazna struja je usko, gotovo horizontalno područje u kojem su brzine vjetra izrazito velike (katkad i do 500 km h^{-1}). Mlazna struja se povremeno pojavljuje u blizini granice između troposfere i stratosfere, a koju nazivamo tropopauza. U našim zemljopisnim širinama tropopauza se u prosjeku nalazi na oko 12 km visine. Kako se u uskom i plitkom području mlazne struje brzina

jako mijenja s visinom (slika 2), tu nastaju vrtlozi koji u blizini tropopauze miješaju troposferski i stratosferski zrak.



Slika 2. Shematski prikaz brzine vjetra u troposferi. U blizini tropopauze katkad se može pojaviti plitko, gotovo horizontalno područje vrlo velikih brzina, koje nazivamo mlazna struja. Brzine u mlaznoj struji mogu biti i do 500 km h^{-1} (blizu 140 m s^{-1}). Vrtlozi, koji nastaju zbog naglih promjena brzine duž vertikale, miješaju troposferski i stratosferski zrak.

Ovdje ćemo promatrati drugi proces koji je odgovoran za prodor stratosferskog zraka u troposferu, a vezan je uz mlaznu struju (slika 3). Do njega dolazi zbog narušavanja geostrofičke ravnoteže. Pri geostrofičkoj ravnoteži strujanje je neakcelerirano, što znači da su strujnice međusobno paralelne, a horizontalna komponenta sile gradijenta tlaka uravnotežena je s horizontalnom komponentom Coriolisove sile. U mlaznoj struji strujnice nisu paralelne, već se na njenom stražnjem (ulaznom) dijelu međusobno približavaju, a na prednjem (izlaznom) dijelu udaljavaju jedna od druge. Kako su horizontalne brzine to veće što su strujnice međusobno bliže, to znači da na stražnjem dijelu mlazne struje horizontalna brzina raste idući u smjeru strujanja. Suprotno tome, na prednjem dijelu mlazne struje horizontalna brzina opada u smjeru strujanja.



Slika 3. Strujnice u mlaznoj struji na slici su prikazane crnim krivuljama. Zbog narušavanja geostrofičke ravnoteže, tj. ravnoteže između horizontalne komponente sile gradijenta tlaka (crvena) i horizontalne komponente Coriolisove sile (zeleni), javljaju se dvije sekundarne cirkulacije u vertikalnoj ravnini (plava). Jedna se uspostavlja na stražnjoj (ulaznoj), a druga na prednjoj (izlaznoj) strani mlazne struje. Na stražnjoj desnoj strani mlazne struje zrak se diže, a na lijevoj spušta. Na prednjoj lijevoj strani mlazne struje zrak se diže, a na desnoj spušta.

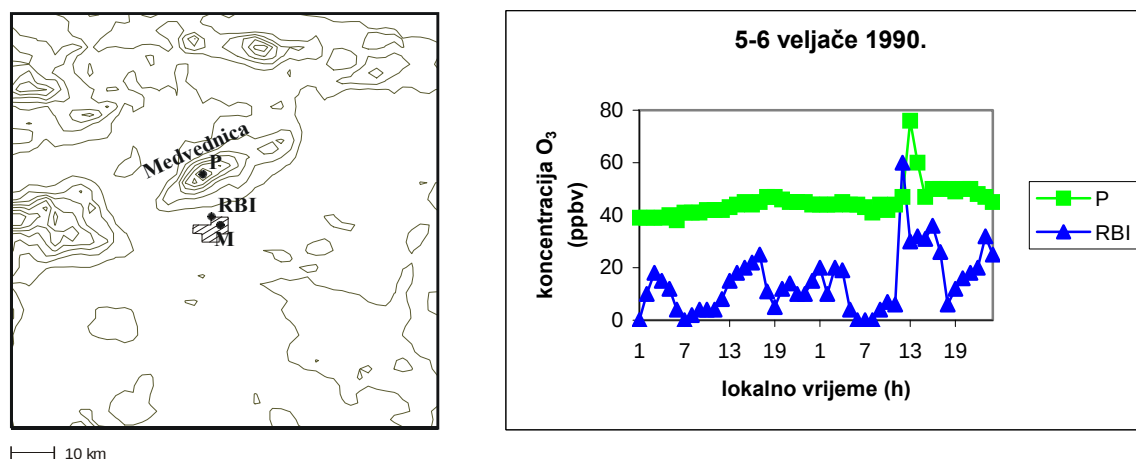
Kako je brzina to veća što je veći gradijent tlaka, područja u kojima brzina raste ujedino su i područja u kojima horizontalni gradijent tlaka (a time i horizontalna komponenta sile gradijenta tlaka) raste idući u smjeru strujanja. To se u mlaznoj struji događa na njenoj stražnjoj (ulaznoj) strani. Kako se pri tom zemljopisna širina prateći strujanje ne mijenja dovoljno da bi se horizontalna komponenta Coriolisove sile uspjela uravnotežiti s horizontalnom komponentom sile gradijenta tlaka, na ulaznoj strani mlazne struje razvija se komponenta horizontalne brzine u smjeru sile gradijenta tlaka (koja je tu veća od Coriolisove sile). U skladu s tim zrak se na stražnjoj lijevoj strani mlazne struje nagomilava, dok ga na stražnjoj desnoj strani ima sve manje. Kako je masa zraka sačuvana, to se 'manjak' zraka na stražnjoj desnoj strani kompenzira dotokom zraka iz nižih slojeva, a 'višak' zraka na stražnjoj lijevoj strani spušta se. Zbog zakona sačuvanja mase, zrak koji se spušta, kad doprije u manje visine počinje horizontalno strujati prema području u kojem se zrak diže. Na taj način uspostavlja se zatvorena cirkulaciona ćelija u vertikalnoj ravnini. Kako ta cirkulaciona ćelija nastaje zbog osnovnog (primarnog) strujanja (u ovom slučaju primarno strujanje je horizontalna mlazna struja), nazivamo je **sekundarna cirkulacija**.

Slično, neravnoteža sila duž horizontale javlja se i na prednjoj (izlaznoj) strani mlazne struje. Coriolisova sila i dalje je duž strujnica gotovo nepromijenjena, budući da se zemljopisna širina zraka pri gibanju vrlo malo mijenja. Za razliku od toga sila gradijenta tlaka u smjeru strujanja sve je slabija, budući da se strujnice sve više međusobno udaljavaju. Stoga se razvija komponenta horizontalne brzine u smjeru Coriolisove sile (koja je tu po iznosu veća od sile gradijenta tlaka). Posljedica toga je nagomilavanje zraka na prednjoj desnoj strani mlazne struje te njegov manjak na prednjoj lijevoj strani. Zbog zakona sačuvanja mase, zrak se u području nagomilavanja spušta, a u području iz kojeg horizontalno otječe, podiže. Cirkulaciona ćelija zatvara se u manjim visinama strujanjem zraka iz područja spuštanja prema području uzdizanja.

Da bi zrak prodro iz stratosfere u troposferu mora se spuštati. Stoga je iz slike 3 očito da stratosferska intruzija može nastati na prednjoj desnoj i na stražnjoj lijevoj strani mlazne struje. Premda su teorijski uvjeti za intruziju povoljni u oba ova područja, iskustvo pokazuje da do intruzije češće dolazi na prednjoj desnoj (izlaznoj) strani mlazne struje. Nadalje, intruzija se u atmosferi češće događa zimi i u proljeće nego ljeti i u jesen.

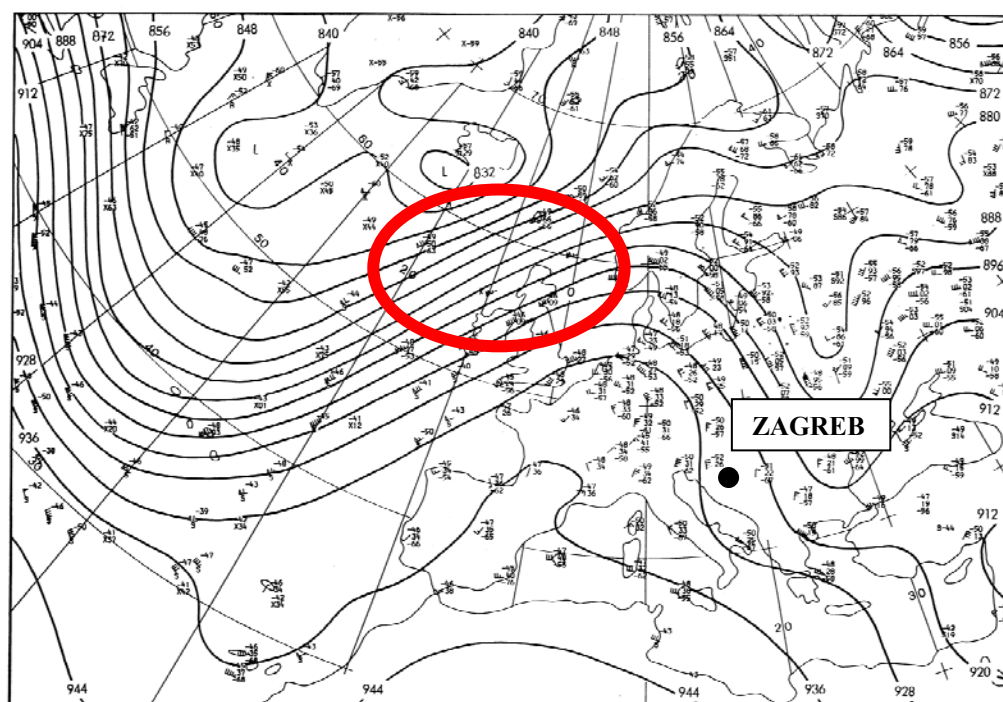
Primjer stratosferske intruzije u Zagrebu 6. veljače 1990. godine

Da bi sa sigurnošću mogli potvrditi da je došlo do intruzije stratosferskog zraka, moramo sagledati sve činjenice koje ukazuju da zrak ima stratosferske karakteristike. Također, moramo ispitati da li su atmosferski uvjeti takvi da omogućavaju intruziju. Jedan takav događaj zbio se u veljači 1990. godine, kada je nad širim područjem Zagreba ustanovljen nagli skok koncentracije ozona (slika 4), popraćen istovremenim padom relativne vlažnosti zraka.



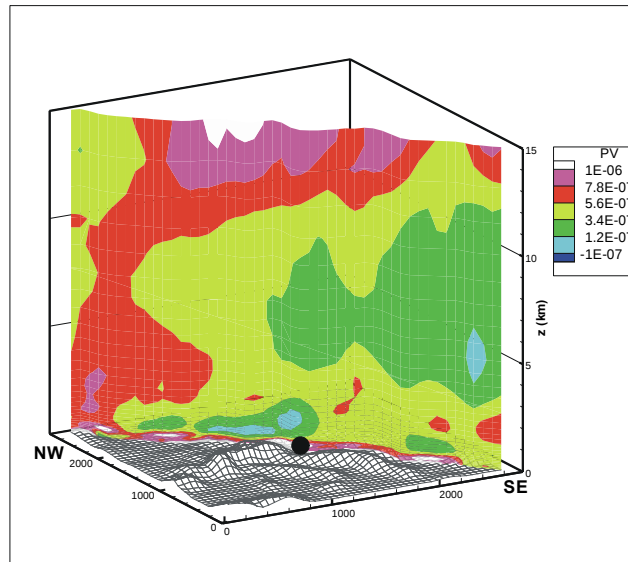
Slika 4. Porast koncentracije ozona izmjerene je 6. veljače 1990. godine na dva mjerna mjesta na širem području Zagreba. Koncentracija je najprije oko 12 sati lokalnog vremena porasla na institutu Ruđer Bošković (točka RBI na slici lijevo), a nešto kasnije na Puntijarki (točka P na slici lijevo). Istog dana na meteorološkoj postaji Maksimir (točka M) izmjereno je nagli pad vlažnosti zraka.

Da provjerimo da li se zaista radilo o stratosferskoj intruziji, pogledati ćemo meteorološke uvjete koji su u promatranom razdoblju postojali nad Europom. Pogledamo li polje strujanja uočavamo da već 5. veljače u 1 h lokalnog zagrebačkog vremena nad zapadnom Europom na visinama na kojima je tlak jednak 300 hPa postoji mlazna struja (slika 5). Uočavamo da se Zagreb nalazi na prednjoj (izlaznoj) desnoj strani mlazne struje, dakle u području u kojem zbog sekundarne cirkulacije u vertikalnoj ravnini postoji spuštanje zraka iz visine. Prema tome, meteorološki uvjeti povoljni za stratosfersku intruziju postoje već dan prije no što su visoke koncentracije ozona izmjerene pri tlu. Slijedećeg dana, koji ovdje nije prikazan, mlazna struja postoji i dalje, te je jača nego dan ranije. To znači da su 6. veljače horizontalne brzine unutar mlazne struje veće od brzina 5. veljače. Istovremeno i sekundarne cirkulacije u vertikalnoj ravnini moraju biti jače razvijene od onih prethodnog dana.

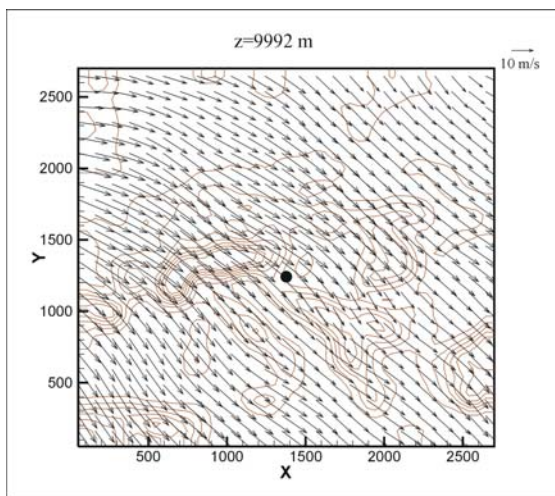


Slika 5. Strujnice nad Europom na plohi na kojoj je tlak jednak 300 hPa na dan 5. veljače 1990. godine u 1 h lokalnog zagrebačkog vremena. Strujnice su određene na temelju mjerenja. Uočava se mlazna struja nad sjeverozapadnom Europom (na slici je područje najvećih brzina vjeta označeno crvenom bojom). Zagreb se nalazi prednjoj (izlaznoj) desnoj strani mlazne struje.

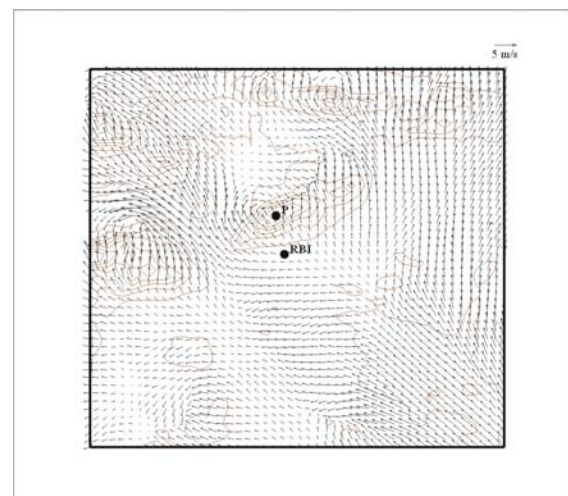
Numerički proračun potencijalne vrtložnosti, koji je dobiven meteorološkim modelom pokazuje da se 5. veljače u 1 h lokalnog zagrebačkog vremena u troposferi nalazi područje povećane potencijalne vrtložnosti (slika 6.). To područje, koje ukazuje na zrak stratosferskog porijekla, 5. veljače nalazi se sjeverozapadno od Zagreba. Pogledamo li horizontalno strujanje zraka, uočavamo da je ono tijekom 5. i 6. veljače u gornjem dijelu troposfere sjeverozapadno. Drugim riječima, zrak povećane potencijalne vrtložnosti (dakle zrak stratosferskog porijekla, koji je bogat ozonom) duž horizontale putuje prema Zagrebu. Na slici 7 prikazan je samo vjetar izračunat numeričkim modelom za visinu od oko 10 km nad tlom za 5. veljače u 13 h lokalnog zagrebačkog vremena. Međutim slično horizontalno strujanje dobiveno je numeričkim proračunom za cijeli gornji dio troposfere počev od oko 4 km nad tlom i to tijekom cijelog dana 5. veljače te 6. veljače ujutro. Valja naglasiti da se stratosferski zrak, koji horizontalno putuje prema Zagrebu, istovremeno spušta prema tlu zbog silaznog strujanja razvijenog na prednjoj desnoj strani mlazne struje. Spuštanje zraka dodatno je pospješeno djelovanjem anticiklone koja u promatranom razdoblju postoji nad Srednjom Europom.



Slika 6. Vertikalni presjek potencijalne vrtložnosti (PV, $\text{K m Pa}^{-1} \text{ s}^{-3}$) za 5. veljače 1990. u 1 h lokalnog zagrebačkog vremena. Potencijalna vrtložnost je izračunata meteorološkim numeričkim modelom. Baza presjeka orijentirana je u smjeru sjeverozapad-jugoistok. Duljina baze je oko 3800 km, a visina vertikalnog presjeka je 15 km. Vertikalni presjek nalazi se nešto sjeveroistočnije od Zagreba. Položaj Zagreba prikazan je kružićem.



Slika 7. Numeričkim modelom izračunate horizontalne brzine vjetra na visini 9992 m nad tlom za 5. lipnja u 13 h lokalnog zagrebačkog vremena. Prikazano je područje od $2700 \times 2700 \text{ km}^2$. Položaj Zagreba naznačen je kružićem. Sjeverozapadno od Zagreba, gdje zrak ima povećanu potencijalnu vrtložnost, strujanje je sa sjeverozapada.



Slika 8. Numeričkim modelom izračunate horizontalne brzine vjetra pri tlu na širem zagrebačkom području ($100 \times 100 \text{ km}^2$) za 6. veljače 1990. u 13 h lokalnog vremena.

Detaljnije ispitivanje strujanja pri tlu pokazalo je da je prizemni vjetar u okolici Zagreba u vrijeme kad je u Zagrebu koncentracija ozona porasla, takav da zrak pri tlu struji od jugoistoka prema gradu. Na slici 8 prikazano je prizemno polje strujanja u 13 h lokalnog vremena (kada je na Puntijarki koncentracija ozona porasla). Slično strujanje pri tlu izračunato je i za prethodne sate. Na temelju izračunatog prizemnog polja strujanja te na temelju mjerenja koncentracije ozona na Institutu Ruđer Bošković (RBI) i na Puntijarki (P), možemo zaključiti da je stratosferski zrak do tla morao dospjeti jugoistočnije od Zagreba. Odatle je nošen prizemnim vjetrom uzrokovao najprije porast koncentracije ozona na Institutu Ruđer Bošković, a četrdesetak minuta kasnije i na Puntijarki.

Zaključci

Atmosferska stujanja promatrana nad velikim područjem zbog približno postignute ravnoteže sila gotovo su horizontalna. Stoga u atmosferi postoje dobro definirani slojevi različitih karakteristika koji se međusobno miješaju samo ako za to postoje povoljni meteorološki uvjeti.

Prodor zraka iz stratosfere u troposferu u umjerenim zemljopisnim širinama može se dogoditi ako pri vrhu troposfere postoji razvijena mlazna struja. Zrak koji tada dođe u troposferu razlikuje se od okolnog troposferskog zraka po velikoj koncentraciji ozona, maloj vlažnosti te visokim vrijednostima potencijalne vrtložnosti.

Stratosferska intruzija nije rijetka pojava. Prema nekim istraživanjima dnevno se na sjevernoj hemisferi može istovremeno dogoditi i do nekoliko prodora stratosferskog zraka. Ovdje opisan događaj interesantan je po tome što je stratosferski zrak prodrio do same Zemljine površine zadržavši pri tom svoja kemijska svojstva. Često intruzija bude plića, a zrak se brže izmiješa s okolnim troposferskim zrakom, pa se pri tlu ne uočava povećana koncentracija ozona. Potencijalna vrtložnost se u ovom slučaju prilično brzo smanjila, tako da je već 6. veljače imala uobičajene troposferske vrijednosti.

Literatura

- Andrews, D. G., Holton, J. R., Leovy, C. B., 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Accademic Press, Inc., San Diego, 489 pp.
- Appenzeller, C., Davies, H. C., 1992: Structure of stratospheric intrusions into the troposphere. *Nature*, **358**, 570-572.
- Bithell, M., Gray, L. J., Cox, B. D., 1999: A three-dimensional view of the evolution of midlatitude stratospheric intrusions. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 673-688.
- Bithell, M., Vaughan, G., Gray, L. J., 2000: Persistence of stratospheric ozone layers in the troposphere. *Atmos. Environ.*, **34**, 2563-2570.
- Cox, B. D., Bithell, M. and Gray, L. J., 1997: Modelling of stratospheric intrusions within a mid-latitude synoptic-scale disturbance, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **123**, 1377-1403.
- Danielsen, E. F., Mohnen, V. A., 1977: Project Dustorm report: ozone transport, in situ measurements, and meteorological analyses of tropopause folding. *J. Geophys. Res.*, **82**, 5867-5877.
- Lisac, I., Marki, A., Tiljak, D., Klasinc, L., Cvitaš, T., 1993: Stratospheric ozone intrusion over Zagreb, Croatia, on February 6, 1990. *Meteorol. Zeitschrift*, **N.F. 2**, 224-231.
- Olsen, M. A., Stanford, J. L., 2001: Evidence of stratosphere-to-troposphere transport within a mesoscale model and Total Ozone Mapping Spectrometer total ozone. *J. Geophys. Res.*, **106**, 27323-27334.