

POJAV POVIŠANE KONCENTRACIJE OZONA V SLOVENIJI

Melanija Lešnjak*, Anton Planinšek**

UDK 551.510 (497.12)

Na dan 26. junija, ko smo Slovenci razglasili svojo neodvisnost, se je nad našimi kraji pojavila povišana koncentracija ozona v zraku. Primerjava podatkov o meritvah ozona pri nas in v sosednjih državah kaže, da so se tega dne pojavile povišane koncentracije tudi v delu južne Avstrije. V članku je pojav podrobneje opisan. Za boljše razumevanje namena spremljanja ozona v spodnji troposferi je problematika obravnavana malo širše.

Ozon v ozračju

Ozon je poznan kot naravna sestavina v zraku od sredine 19. stoletja. Čeprav je prisoten v sledovih, je za življenje na zemlji zelo pomemben. Okrog 90 % ozona v zemeljskem ozračju se nahaja v stratosferi, kjer ima za zemljo vlogo zaščitnega filtra pred kratkovalnimi ultravijoličnimi žarki. Troposferski ozon, ki ga je le 10 % od vsega ozona v zemeljski atmosferi, pa je pomemben predvsem zaradi svojih oksidacijskih lastnosti, in sicer za vzdrževanje ravnovesja med nekaterimi sestavinami zraka. Troposfera se imenuje spodnji del zemeljske atmosfere, ki sega nad našimi kraji približno od 10 do 12 km visoko, odvisno od letnega časa. Nad njo je stratosfera, meja med obema pa se imenuje tropopavza.

Za ozon v troposferi sta poznana dva izvora. Prvi je vdor ozona v troposfero ob vertikalnem mešanju zračnih mas iz stratosfere, kjer nastaja pri fotolizi molekule kisika. Drugi izvor je sinteza v sami troposferi pri fotolizi NO_2 in v prisotnosti ogljikovodikov. Ta mehanizem je po zadnjih teorijah pomembnejši vir troposferskega ozona kot pojav izmenjave med stratosfero in troposfero (1).

Prizemni ozon

Raziskave v zvezi s prizemnim ozonom so osredotočene na dve tematici: opazovanje dolgoročnih sprememb v koncentracijah ozadja in raziskave epizod ozona. Analize rezultatov dolgoletnega spremljanja ozona na zemeljski površini in navzgor do tropopavze namreč kažejo (2), da se koncentracija nad severno poloblo konstantno povečuje in da se je koncentracija prizemnega ozona nad Evropo v zadnjih stotih letih podvojila (z 10 ppb na 20 ppb). Tako povečanje ozona se pripisuje skokovitemu povečanju antropogenih emisij ogljikovodikov, ogljikovega monoksida in dušikovih oksidov v tem stoletju. Zaradi naraščanja koncentracij ozadja so višje tudi kratkotrajne konice, ki jim pravimo epizode. Za centralno Evropo velja, da so povprečne koncentracije na podežlju med 20 in 40 ppb ter v hribi na višinah nad 1000 m med 30 in 50 ppb. (Enota ppb je koncentracijska enota, ki pomeni eno milijardinko vo-

lumskega deleža oziroma okrog $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ za primer ozona pri temperaturi 20°C .) O epizodah ozona pa govorimo v primerih, ko koncentracije presegajo 100 ppb.

Pojave visokih prizemnih koncentracij ozona, ki imajo negativne učinke na ljudi in vegetacijo, v Evropi intenzivno raziskujemo v povezavi z onesnaženostjo zraka v okviru Eurekinega raziskovalnega projekta EUROTRAC v programu TOR (Tropospheric Ozone Research ali Raziskave troposferskega ozona). V okviru sodelovanja Alpe-Jadran pa se je delovna skupina, ki se ukvarja z onesnaženostjo zraka in umiranjem gozdov, dogovorila, da se sodelujoče države o primerih povišanih koncentracij ozona obvestijo takoj prek telefaksa. Naša država sodeluje v tej akciji, v letošnjem letu pa se poteguje tudi za vključitev v program TOR.

Dosedanje raziskave kažejo, da so za povišanje koncentracij prizemnega ozona možni naslednji vzroki:

- Transport naravnega ozona iz stratosfere z direktno cirkulacijo. Take epizode so redke (pod en odstotek časa), visoke koncentracije med 100 in 300 ppb pa trajajo le kratek čas, od ene do treh ur. Običajno se pojavljajo spomladi.
- Površinski transport v troposferi. Ozon, nakopičen na določeni višini nad zemljo kot fotokemijski smog, se transportira na daljave in odlaga na zemeljsko površino. Življenjska doba fotokemijsko nastalega ozona v višinah okrog 1500 m je od nekaj dni do tednov, prizemna epizoda pa lahko zajame široko območje do več sto kilometrov.
- Lokalni fotokemijski nastanek ozona. Vzrok je lokalna emisija dušikovih oksidov in ogljikovodikov. Značilno je, da se pojavijo visoke koncentracije ozona nekaj ur po emisiji in v obsegu do sto kilometrov od vira onesnaževanja zraka.

Škodljivi učinki

Negativni učinki ozona so povezani z njegovo veliko kemijsko reaktivnostjo. Še pred dvajsetimi leti je prevladovalo prepričanje, da je ozon spremljevalec čistega zraka in da so njegovi učinki na zdravje le ugodni. Danes vemo, da je lahko

ozon sekundarni produkt pri fotokemijskih reakcijah v onesnaženem zraku, škodljiv pa je lahko že pri koncentracijah, ki so malo višje od naravnega ozadja. Pri ljudeh so doslej poznani le učinki kratkotrajnih visokih koncentracij ozona (akutni efekti), posledice dolgotrajne izpostavljenosti nižjim koncentracijam (kronični efekti) pa so še premalo raziskane. Najbolj so prizadeti dihalni organi in sluznica. Svetovna zdravstvena organizacija (WHO) poroča o negativnih učinkih ozona na zdravje občutljivih ljudi pri koncentracijah nad 100 ppb v času trajanja eno uro ter pri koncentracijah nad 60 ppb pri izpostavljenosti nad 8 ur (1). Za rastline je ozon še bolj toksičen, saj so občutljive vrste prizadete že pri kratkotrajnih koncentracijah nad 40 ppb. Za zaščito rastlin WHO priporoča povprečno koncentracijo ozona v vegetacijski dobi pod 30 ppb (1). Za primerjavo navedimo, da je koncentracija ozona na podežlju v centralni Evropi v povprečju med 20 in 40 ppb, v hribi nad 1000 m nadmorske višine pa so koncentracije nekoliko višje (v povprečju med 30 in 50 ppb) in odražajo nivo v prosti troposferi.

Epizoda ozona v Sloveniji

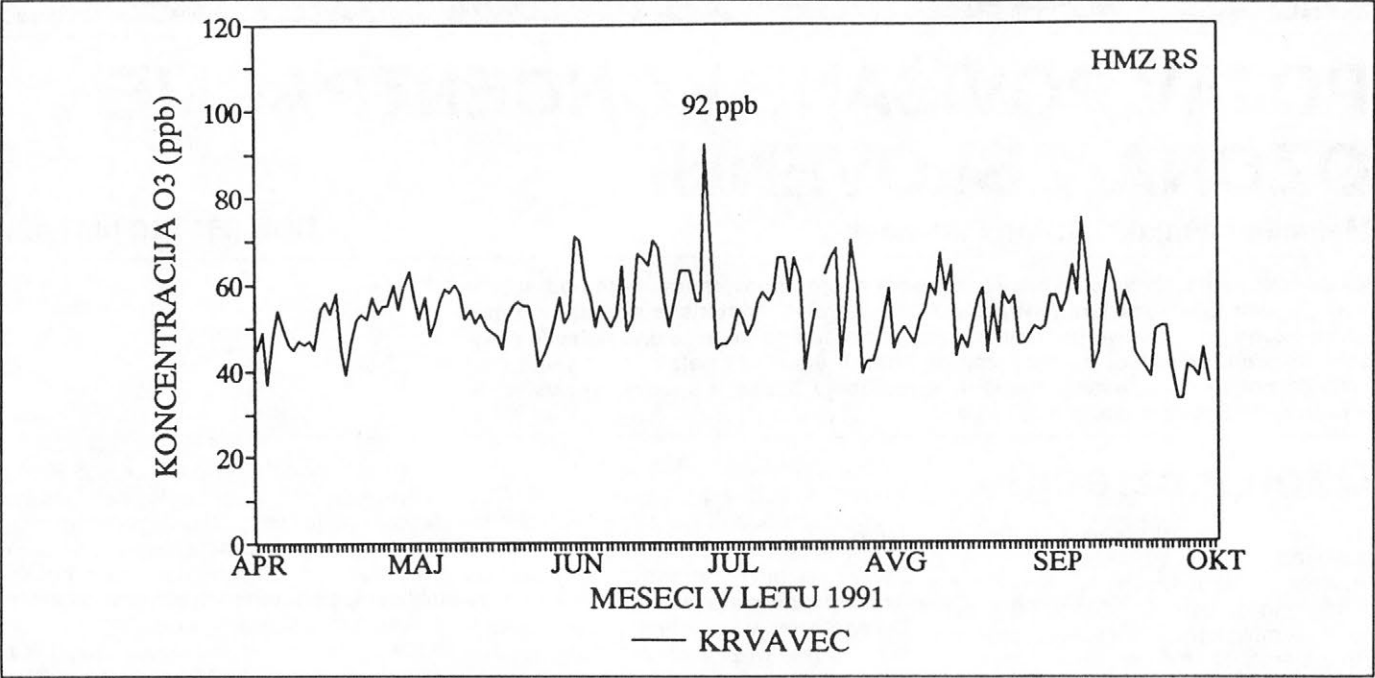
V Sloveniji potekajo meritve ozona na štirih stalnih lokacijah: v Ljubljani, na Kravcu in na dveh mestih v okolici termoelektrarne Šoštanj.

Potek 24-urnih povprečnih koncentracij ozona na Kravcu v času nekurilne sezone je prikazan na sliki 1 (9). Razločno odstopa konica 26. junija. Na Kravcu je bila zabeležena povišana koncentracija ves dan. Povprečna 24-urna koncentracija je bila kar 92 ppb, konica nad 100 ppb pa je trajala pet ur. V Ljubljani (9) je bila tega dne koncentracija 100 ppb presežena dve uri in pol, 24-urno povprečje pa je bilo 52 ppb (slika 2).

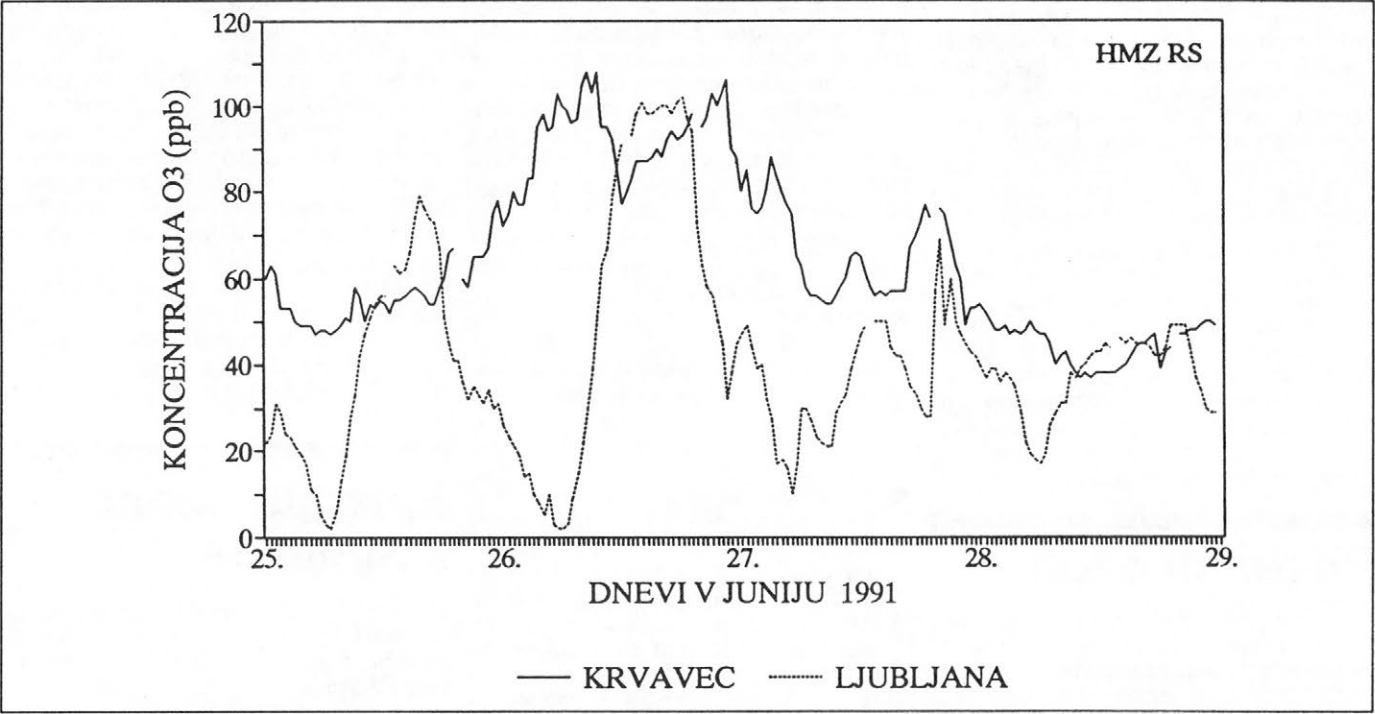
Postaji v Ljubljani in na Kravcu se glede dnevnega hoda ozona bistveno razlikujeta. Za urbano okolje so značilna velika nihanja ozona zaradi onesnaženosti zraka. Ozon hitro reagira z dušikovim monoksidom (NO), ki izvira v mestu v času nekurilne sezone pretežno iz prometa, in v času prometne konice pade koncentracija

* Ministrstvo za varstvo okolja in urejanje prostora, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, Vojkova 1 b, Ljubljana.

** Ministrstvo za varstvo okolja in urejanje prostora, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, Vojkova 1 b, Ljubljana.



Slika 1. Potek 24-urnih koncentracij (povprečje iz 1/2-urnih podatkov) ozona na Krvavcu (oddajnik RTV, 1720 m n. v.) za obdobje april—september 1991 (9).



Slika 2. Dnevni hod ozona v Ljubljani (Bežigrad) in na Krvavcu v času od 25. do 28. 6. 1991 (9). Polurni podatki.

pod nivo ozadja. Ob določenih vremenskih razmerah (stabilna atmosfera in velika intenziteta sončnega sevanja) pa se lahko zaradi jutranjih emisij dušikovih oksidov in ogljikovodikov pojavi popoldne fotokemijski smog. Za dnevni hod ozona v mestu je značilen minimum zgodaj dopoldne, sledi povečanje koncentracije prek dneva in upadanje z mrakom ter prek noči, ko prenehajo vse fotokemijske reakcije. Drugače je na postaji na Krvavcu, kjer je ozračje čisto. Koncentracija ozona je prek dneva dokaj konstantna in je v mejah naravnega nihanja nivoja ozadja. Primerjava podatkov z obeh postaj kaže, da so bile 26. junija povišane

koncentracije ozona tako v višjih nadmorskih legah (Krvavec, 1720 m) kot tudi v nižini. Na tem primeru vidimo, kako pomemben podatek za razlago konic ozona je nivo ozadja. Podatki iz Ljubljane nas namreč lahko zavedejo, da gre v tem primeru za fotokemijski smog lokalnega značaja. Podatki s Krvavca, ki kažejo nivo ozadja, in podatki z merilnih postaj v Avstriji ter na Hrvaškem pa potrjujejo, da gre za pojav širših razsežnosti. V Avstriji so bile tega dne zabeležene najvišje koncentracije na Koroškem (10). Tako je bila na postaji St. Paul-Herzogberg (okrog 900 m n. v.) v skrajni vzhodni

Koroški zabeležena povprečna 24-urna koncentracija 60 ppb, konica med 100 in 105 ppb pa je trajala tri ure. V Celovcu in Beljaku je trajala povišana koncentracija 78 ppb okrog pet ur. Nekoliko višje koncentracije so se pojavile tudi v Vzhodni Tirolski (6). Na postaji Gaimberg (1250 m) pri Lienzu je bila izmerjena maksimalna polurna vrednost 83 ppb. Na Štajerskem (3) so bile nekoliko povišane koncentracije v Gradcu (polurni maksimum 73 ppb) in zahodno na postajah Gaberl (1551 m) in Hochgössnitz (900 m), kjer je bil polurni maksimum 65 ppb. V drugih delih Avstrije ni bilo opaziti povišanja koncentracij (4, 5, 7). Prav tako je bil nivo koncen-

tracij v običajnih mejah v Zagrebu ter na Medvednici na postaji Puntijarka (980 m) (11).

Meteorološke razmere

Meteorološka situacija od 25. do 27. 6. 1991

25. 6.

Nad srednjo Evropo je bilo polje enakomernega zračnega pritiska. Hladna fronta je bila zjutraj severno od Alp, čez dan se je pomaknila na vzhodu nad Panonsko nižino, čez Alpe pa ne. Na višini 5000 m so nad našimi kraji pihali zmerni severozahodni vetrovi, na 3000 m so pihali šibki severozahodni vetrovi, na 1500 m pa zmerni zahodni vetrovi.

26. 6.

Zjutraj je bilo nad srednjo Evropo in nad Sredozemljem polje enakomernega zračnega pritiska. Topla fronta se je pomikala čez Poljsko proti vzhodu, hladna fronta pa je dosegla Rokavski preliv. Čez dan se je hladna fronta približala Alpam. Na 3000 m in 5000 m nad našimi kraji so pihali zmerni, na 1500 m pa šibki jugozahodni vetrovi.

27. 6.

V noči od 26. 6. na 27. 6. je hladna fronta dosegla Alpe, kjer se je zadržala čez dan in šele ponoči prešla Slovenijo. V celi plati do 5000 m so nad našimi kraji pihali zmerni do močni jugozahodni vetrovi.

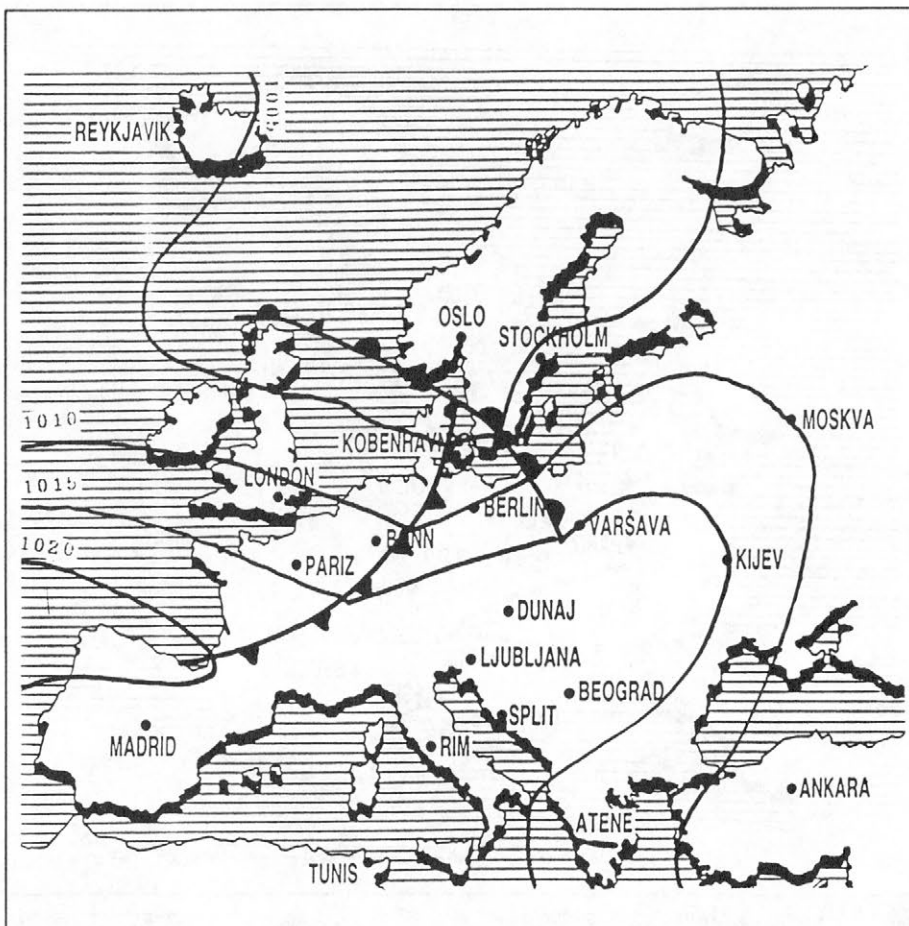
Vremenska situacija za 26. in 27. 6. 1992 je prikazana na slikah 3 in 4.

24-urne trajektorije

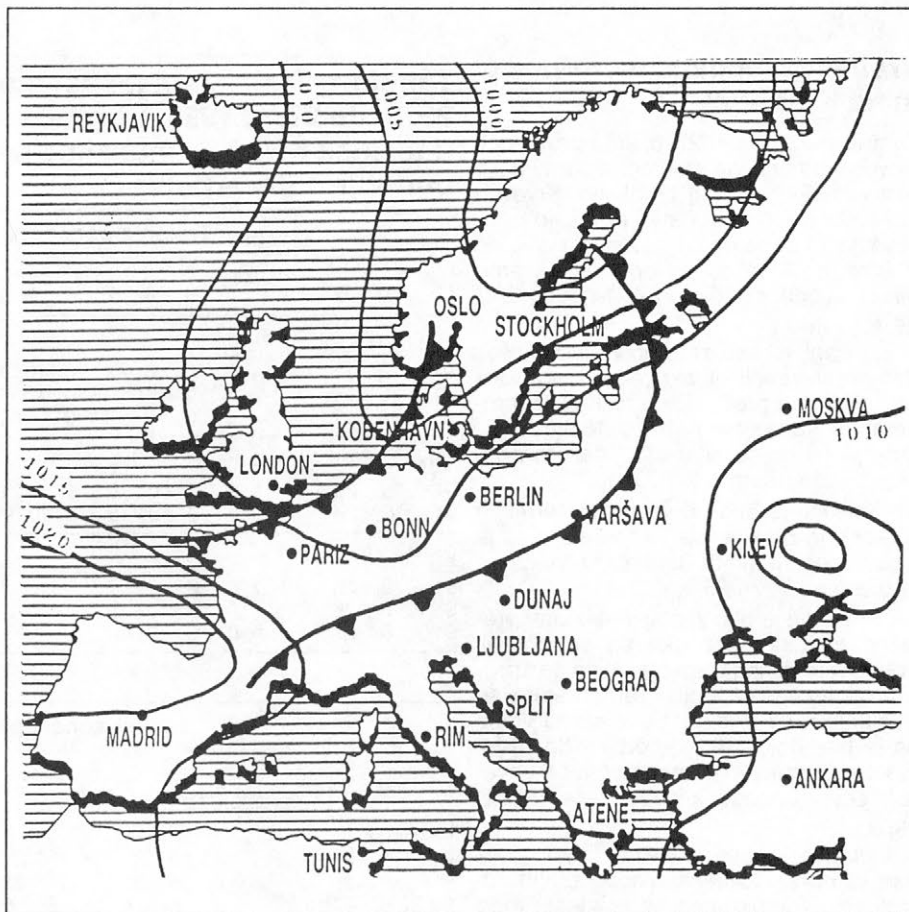
Na podlagi podatkov iz Evropskega centra za srednjeročno prognozo vremena prognostična služba pri Hidrometeorološkem zavodu Republike Slovenije operativno računa trajektorije v Ljubljano za standardne pritiskove ploskve 500 mb, 700 mb in 850 mb. Te trajektorije nam kažejo pot, po kateri se je gibal zrak zadnjih 24 ur, preden je prispel nad določeno točko. Za Ljubljano so izračunane trajektorije za zrak, ki je nad mestom ob 1. uri po srednjeevropskem času. 26. 6., ko so bile v naših krajih najvišje koncentracije ozona, je nad naše kraje v višinah med 1500 m in 3000 m pritekal zrak iznad Padske nižine (slika 5).

Vreme nad Padsko nižino

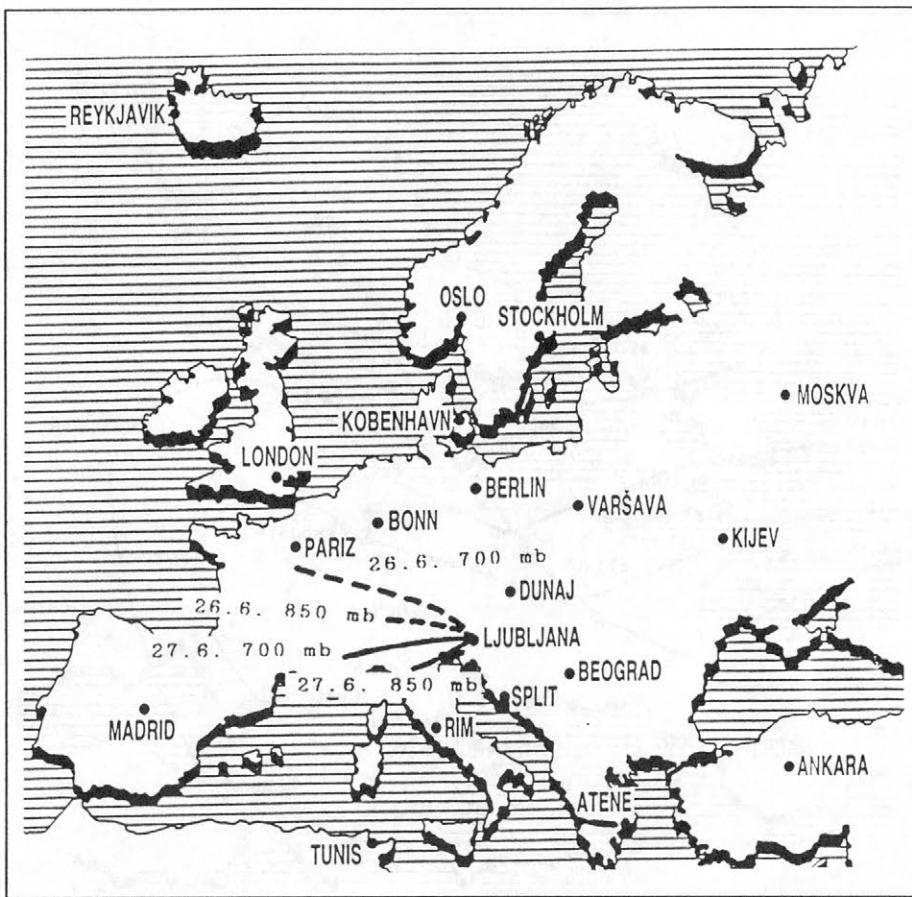
Podatki o vremenu 25. in 26. 6. nad Padsko nižino kažejo, da je bilo tam pretežno jasno vreme s temperaturami zraka prek 30°C. Čez dan so se razvili oblaki vertikalnega razvoja (kumulusi), ki se ne razvijajo tako visoko, da bi dosegli stratosfero. Radiosondažne meritve temperature nad Vidmom (Udine) kažejo, da je temperatura zraka precej enakomerno padala s povprečnim gradientom okoli 7°C/km do višine 5000 m. To pomeni, da se je zrak iz nižin premešal v višje plasti.



Slika 3. Vremenska situacija 26. 6. 1991 ob 7. uri po srednjeevropskem času (9).



Slika 4. Vremenska situacija 27. 6. 1991 ob 7. uri po srednjeevropskem času (9).



Slika 5. 24-urne trajektorije za Ljubljano za 26. 6. in 27. 6. 1991 ob 1. uri po srednjeevropskem času; 700- in 850-mb ploskvi (9).

do 90 %, odvisno od temperature. Pihal je šibak veter, ki se je čez dan okrepil v zmeren zahodnik in jugozahodnik, zvečer pa se je znova polegel.

Krvavec je bil ob 7. uri v oblaku, ob 14. uri je bilo oblačno, ob 21. uri pa pretežno oblačno. V primerjavi s podatki iz Ljubljane lahko trdimo, da so bili ti oblaki omejeni na pobočja hribov. Relativna vlaga je bila dokaj visoka, od 71 do 100 %, temperatura pa se je gibala med 12 in 14° C. Pihali so zmerni vetrovi različnih smeri.

Na Kredarici je bilo zjutraj jasno, čez dan pa se je zmerno razvila kopasta oblačnost. Pihal je zmeren severni in severozahodni veter. Temperatura se je gibala od 9 do 12° C ob razmeroma visoki vlagi.

27. 6.
Na vseh treh obravnavanih meteoroloških postajah se je pooblačilo. V hribihi je deževalo, pihali so južni vetrovi, v Ljubljani pa je začelo deževati šele zvečer.

Sončno sevanje

Za trajanje sončnega obsevanja so uporabljeni podatki iz Ljubljane, z Brnika in s Kredarice. Podatki za Brnik za 27. 6. zaradi vojne niso bili zbrani. Podatki so podani za vsako uro, in sicer s številkami od 0 do 10, ki pomenijo trajanje sončnega obsevanja v desetinah ure. Podatki so prikazani v tabeli 1. Globalno sevanje je prav tako podano po urah, in sicer v enotah J/cm². V Sloveniji se meri globalno sevanje v Ljubljani, Mariboru in Portorožu, zato podajamo samo podatke za Ljubljano.

Vreme v Ljubljani, na Krvavcu in na Kredarici

Za dneve 25., 26. in 27. 6. smo pregledali razvoj vremena na podlagi opazovanj z meteoroloških postaj Ljubljana, Krvavec in Kredarica. Na Kredarici potekajo opazovanja 24 ur na dan, v Ljubljani od 7. do 21. ure, na Krvavcu pa opazujejo vreme trikrat na dan, in sicer ob 7., 14. in 21. uri.

25. 6.
V Ljubljani je bilo zmerno oblačno, čez dan so se razvili oblaki vertikalnega razvoja, ki so se proti večeru razkrojili. Temperature so se gibale med 18 in 20° C. Zrak je bil precej vlažen, z delnim pritiskom vodne pare okoli 20 mb.

Na Krvavcu je bilo ob vseh treh terminih oblačno in brez vetra. Temperatura se je gibala med 11 in 15° C, relativna vlaga pa je bila med 71 in 95 %.

Na Kredarici je bilo zjutraj in čez dan pretežno oblačno, čez dan so se pojavili oblaki vertikalnega razvoja, ki so se proti večeru razkrojili. Temperatura se je gibala med 7 in 11° C, relativna vlaga pa je bila dokaj visoka, od 75 do 91 %. Pihal je zmeren veter, predvsem od severa in severozahoda, ki se je zvečer umiril.

26. 6.
V Ljubljani je bilo pretežno jasno, čez dan se je razvilo nekaj slabo razvitih kumulusov. Temperatura se je gibala med 18 in 31° C, parni pritisk pa je bil okoli 20 mb, kar pomeni relativno vlago od 40

Tabela 1. Trajanje in jakost sončnega sevanja za čas od 25. 6. do 27. 6. 1991. Legenda: L — leto, M — mesec, D — dan, max 64/90 — maksimalne urne vrednosti za junij za obdobje 1964—1990.

Trajanje sončnega sevanja (1/10 ure)																					
			Ura																		
L	M	D	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Ljubljana																					
91	6	25	0	0	0	2	8	10	10	10	10	10	10	10	10	9	7	4	0	0	
91	6	26	0	0	4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	7	9	0	0	
91	6	27	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	2	2	1	0	0	0	0	
Brnik																					
91	6	25	0	0	0	0	3	9	10	10	10	10	10	10	10	10	4	0	0	0	
91	6	26	0	0	0	5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	8	7	0	0	
Kredarica																					
91	6	25	0	0	0	7	8	10	10	10	8	5	2	3	9	10	7	7	3	0	
91	6	26	0	3	10	10	10	10	10	7	6	3	2	3	2	0	0	1	0	0	
91	6	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Jakost sončnega sevanja (J/cm²)																					
			Ura																		
L	M	D	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
Ljubljana																					
91	6	25	4	28	53	134	190	243	259	266	292	240	267	205	151	70	53	14			
91	6	26	7	36	81	132	178	224	256	271	282	261	253	212	166	87	53	10			
91	6	27	4	5	17	35	57	69	97	177	233	176	120	68	58	26	7	2			
max. 64/90			25	92	140	230	264	314	348	369	373	365	314	280	272	281	88	50			

Iz podatkov o trajanju sončnega sevanja vidimo, da sta bila 25. in 26. 6. precej sončna dneva, medtem ko je bilo 27. 6. oblačno. Podatki o jakosti sončnega sevanja v primerjavi z maksimalnimi urnimi vrednostmi pa kažejo, da je bilo ozračje motno in sončno sevanje ni doseglo tal s polno močjo.

Zaključek

Namen tega članka je bil opisati pojav visoke koncentracije ozona v Ljubljani in na Kravcu, ki je bila zabeležena konec junija 1991, in poiskati vzroke. Po primerjavi s podatki o koncentracijah ozona z merilnih mest v sosednjih državah se je pokazalo, da dogodek ni bil lokalnega značaja. Povišane koncentracije so zajele območje, ki je obsegalo zahodno in osrednjo Slovenijo, južno Koroško, južni del avstrijske Štajerske in Vzhodno Tirolsko.

Na fotokemijsko nastajanje in kopičenje ozona v troposferi imajo velik vpliv intenziteta sončnega sevanja, temperatura zraka, stabilnost atmosfere in prisotnost dušikovih oksidov. Iz analize meteoroloških razmer posredno sklepamo na vzroke pojava. Dne 25. junija je bilo nad našimi kraji zmerno oblačno, 26. junija je bilo pretežno jasno, medtem ko je nad Padsko nižino prevladovalo jasno vreme. Temperature so bile visoke z dnevnim maksimumom malo nad 30°C, kar je ugodno za razvoj fotokemijskega ozona. Do višine 5 km je temperatura enakomerno padala z gradientom okoli 7°C/km, tako da se emitirane škodljive snovi niso kopičile le v prizemni plasti zraka. Glede na meteorološke podatke se je zrak 25. in 26. junija premešal na obravnavanem območju do višine malo nad 2000 m. To potrjujejo visoke koncentracije ozona, ki so bile izmerjene na različnih nadmorskih višinah. Trajektorije kažejo, da je prineslo zrak nad Slovenijo iz zahodne Evrope prek Padske nižine, kjer je emisija dušikovih oksidov (iz industrije, energetskih objektov in prometa) mnogo večja kot pri nas.

Iz naštetih dejstev sklepamo, da vzrok za povišane koncentracije ozona ni lokalna emisija, prav tako ne vdor iz stratosfere, temveč gre za transport fotokemijskega smoga iz Padske nižine.

6. Monatsbericht der Immissionsüberwachung, Juni 1991, Amt der Tiroler Landesregierung, Salzburg.
7. Niederösterreichische Luftgütebericht, Monatsbericht 6/91, Juni 1991. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Wien.
8. Penkett, S. A., 1988. Increased tropospheric ozone. *Nature*, Vol. 322, 204–205.
9. Podatki Hidrometeorološkega zavoda R Slovenije.
10. Podatki ustanove Amt der Kärntner Landesregierung, 1991. Klagenfurt.
11. Podatki Inštituta Rudjer Bošković, 1991. Zagreb.

**Marija Lešnjak,
Anton Planinšek**

Ozone Episode in Slovenia

On June 26, 1991, an episode of ozone was detected in Slovenia at two measuring stations: in the city of Ljubljana and

on Mount Kravvec (1720 m asl). At Kravvec, an average 24-hour concentration of 92 ppb was measured with a peak value between 100 and 108 ppb lasting for five hours. In Ljubljana, the value of 100 ppb was exceeded for two and a half hours. However, comparisons of ground-level ozone data from Austria and Croatia indicate that the elevated concentrations were also spread over the southern part of Austria (Carinthia, Steiermark, and East Tyrol).

A brief analysis of meteorological data (the weather situation in Central Europe, meteorological observations in Slovenia) suggests that the weather conditions were more favourable to the photochemical production of ozone than to a stratospheric intrusion phenomenon. However, studies of wind trajectories also show that photochemical smog was transported to Slovenia from Western Europe, from the Po Valley, where emissions of ozone precursors (nitrogen oxides and hydrocarbons) are much higher than in Slovenia.



Gornja Radgona (fotografija Milan Klemenčič).

1. Air Quality Guidelines for Europe, 1987. WHO Regional Publications, European Series No. 23, Copenhagen.
2. Bojkov, R. D., 1984. Tropospheric ozone, its changes and possible radiative effects. Reprint, WMO Special Environmental Report, No. 16.
3. Luftgüterbericht, Juni 1991. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz.
4. Luftgütebericht für Juni 1991, Juni 1991. Amt der Salzburger Landesregierung, Salzburg.
5. Luftgüteüberwachung, Monatsbericht. Juni 1991, Amt der Österreichischen Landesregierung, Linz.