

Dolgoletno spremljanje kakovosti zraka v gozdnih sestojih Slovenije, s poudarkom na ozonu

Long-term monitoring of ambient air quality in forest stands in Slovenia, with a focus on ozone

Daniel ŽLINDRA¹



Izvleček:

Ozon je močan oksidant. Njegova prisotnost v stratosferi varuje Zemljo pred ultravijoličnimi žarki. V zraku, ki nas obkroža, pa ni zaželen. V visokih vsebnostih je še bolj kot za ljudi in živali škodljiv za rastline. Ravno zaradi njegovega vpliva na rastline, predvsem drevice, ga na Gozdarskem inštitutu Slovenije spremljamo v gozdnem prostoru s pasivnimi vzorčevalniki že dvajset let. Vsebnost ozona v zraku je odvisna od njegovih prekurzorjev, gibanja zraka in meteoroloških dejavnikov. Ploskev, ki je z njim v rastnih sezonah najbolj obremenjena, je ploskev Borovec pri Kočevski Reki. Najmanj ozona smo zabeležili na raziskovalnih ploskvah, ki se nahajata v nižinskih poplavnih gozdovih.

Ključne besede: Ozon, pasivni vzorčevalniki, intenzivni monitoring gozdov, raziskovalne ploskve

Abstract:

Ozone is a strong oxidant. Its presence in the stratosphere protects the Earth from ultraviolet rays. But it is not desirable in the ambient air. At high levels, it is even more harmful to plants than to humans and animals. It is precisely because of its impact on plants, especially trees, that the Slovenian Forestry Institute has been monitoring it in forest areas with passive samplers for the last twenty years. The level of ozone in the air depends on its precursors, air movement and meteorological factors. The plot with the highest ozone load during the growing seasons is Borovec near Kočevska Reka. The lowest ozone levels were recorded in the two study plots located in lowland floodplain forests.

Key words: ozone, passive samplers, intensive forest monitoring, research plots

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Ozon je triatomna molekula kisika in je zelo močan oksidant, ki ne nastaja neposredno pri izogrevanju fosilnih goriv ali industrijskih procesih, ampak je produkt okoljskih dejavnikov (visoke temperature, sončno obsevanje) in prisotnosti prekurzorjev ozona (ogljikovodikove spojine in dušikovi oksidi) (How ..., b. l.). Spremljanje kakovosti zraka, ki vključuje predvsem merjenje vsebnosti ozona, opravljamo na Gozdarskem inštitutu Slovenije že vse od začetka intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov leta 2004.

Ozon naj bi bil letno v svetu odgovoren za smrt okrog milijon ljudi (Zhang in sod., 2019), škodljiv pa je tudi za živali ter rastline. Za škodljivo raven ozona za rastline veljajo vsebnosti nad 40 ppb oz. 80 $\mu\text{g O}_3/\text{m}^3$. Dlje časa kot traja izpostavljenost ozonu in višja kot je njegova raven, več poškodb povzroči, ali na respiratornih organih ali listnem

tkivu. V primeru rastlin o stopnji poškodb odloča še en dejavnik, t. j. odprtost listnih rež. Do večjih poškodb na listih pride v primeru, kadar so listne reže bolj odprte. V primeru vodnega stresa, visokih temperatur in sušnega ozračja (Stomatal ..., b. l.), so listne reže zaprte, zato ozon v občutljivo listno tkivo težje prodre in so poškodbe malo verjetne.

Ko je poškodovan asimilacijski aparat lista, se to na nivoju rastline opazi kot slabši prirastek ali pridelek, počasnejša rast ali celo uvelost.

Ocene zmanjšanja prirastka biomase v gozdovih na globalni ravni naj bi znašala okrog 7 % (Ainsworth in sod., 2012). Kolikšen je, pa je odvisno tudi od odpornosti drevesne vrste in celo njenega genoma na njegove učinke (Agathokleous in sod., 2022).

Največji učinek zmanjšanja produkcije biomase ima ozon na mlada listopadna drevesa, bolj kot na starejša. Vpliv ozona je manjši na iglavce kot na listavce (Franz in sod. 2018). Razlika je tudi

¹ D. Ž., Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za gozdno ekologijo, Večna pot 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija, daniel.zlindra@gozdis.si

med zimzelenimi in listopadnimi listavci, kjer so slednji bolj občutljivi (Calatayud in sod., 2011). V nasprotju s splošno ugotovljenimi negativnimi posledicami visoke vsebnosti ozona v zraku v nekaterih študijah ugotavljajo tudi nasprotno, da odziv vseh dreves ni vedno zmanjšan prirastek, ampak lahko povišane vsebnosti ozona v zraku vodijo celo do povečanja prirastka ampak je to prej izjema kot pravilo (Wang in sod., 2016).

Zaradi vpliva ozona na rast in vitalnost drevja je bilo spremljanje vključeno v nabor obveznih parametrov intenzivnega spremljanja gozdnih ekosistemov.

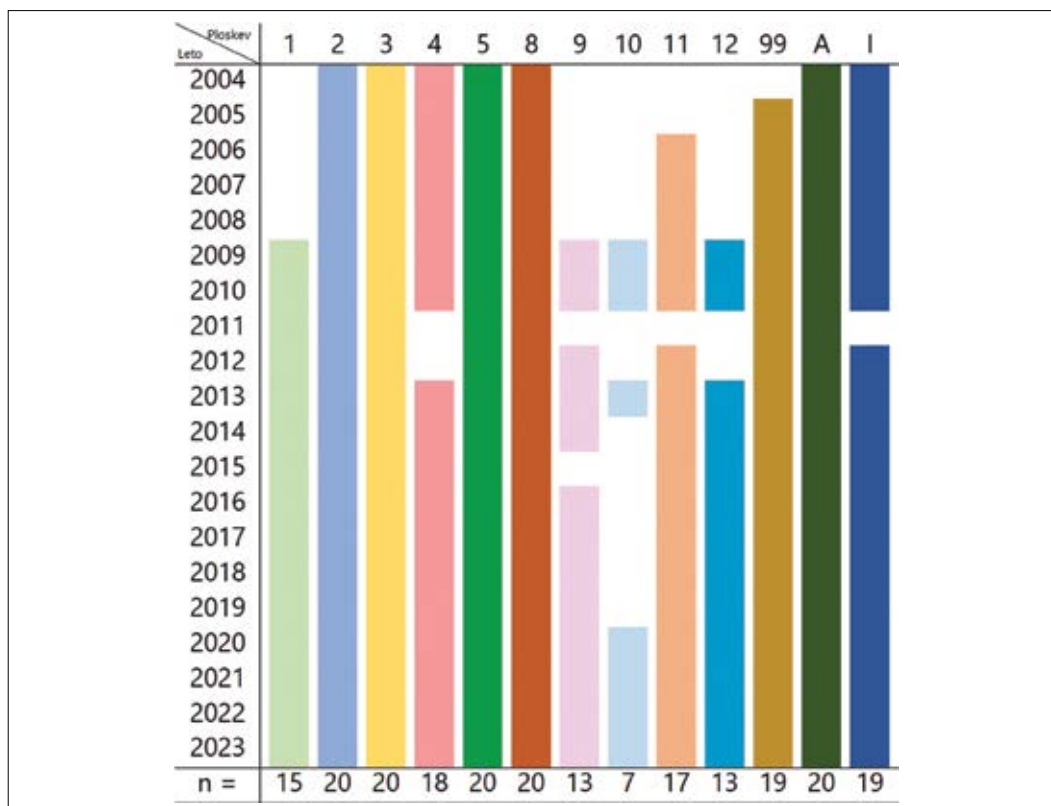
2 RAZISKOVALNE PLOSKVE IN METODE

2 RESEARCH PLOTS AND METHODS

Spremljanje kakovosti zraka, predvsem vsebnost ozona, je obvezna dejavnost v sklopu intenzivnega

monitoringa znotraj programa International Cooperation Program on Forests (ICP Forests) on Forest (Schaub in sod., 2020), zato jo izvajamo že od samega začetka programa v Sloveniji, od leta 2004 (Slika 1). Sprva smo ozon merili le na ploskvah, kjer smo predvidevali visoke vsebnosti v zraku (Fondek, Gropajski bori, Brdo, Borovec in Lontovž). Kasneje smo v odvisnosti od razpoložljivih sredstev število ustrezno prilagajali, vendar na štirih ploskvah spremljamo vsebnosti ozona neprekinjeno (Fondek, Gropajski bori, Borovec, Lontovž).

Za spremljanje vsebnosti ozona v zraku s tehniko pasivnih dozimetrom smo se odločili zaradi stroškov in predvsem infrastrukturnih omejitev kontinuirnih vzorčevalnikov za ozon, saj je potrebno za njihovo delovanje električna energija, ki v gozdu na naših merilnih mestih ni na voljo. Na trgu obstaja več različnih izvedb dozimetrom. Odločili smo se za



Slika 1: Zastopanost meritev ozona po posameznih letih po ploskvah

Figure 1: Ozone measurements by year by plot

Ogawa tip dozimetra (Slika 2). Ta je sestavljen iz v sredini zaprtega valja, z vsake strani pa je med nosilno mrežico vpet aktivni papir, prekrit z luknjičastim pokrovčkom. Molekule ozona, ki prehajajo skozi luknjice do aktivnega papirja, oksidirajo nitritne ione v nitratne. Kvantitativno jih določimo v Laboratoriju za gozdno ekologijo Gozdarskega inštituta Slovenije z ionsko kromatografijo. Eden ali dva seta dozimetrov sta vedno postavljena poleg aktivnih vzorčevalnikov (npr. ARSO postaji v Ljubljani in Iskrbi na Kočevskem), ki služita za kalibracijo.

Takšen set sestavljata po dva dozimetra, ki sta izpostavljena 14 dni, nato ju zamenjamo z novim. Ozon spremljamo v takšnih 14-dnevnih periodah skozi celotno vegetacijsko obdobje. Praviloma začnemo v sredini marca in končamo konec septembra ali v začetku oktobra.

Na Sliki 3 smo predstavili povprečne 14-dnevne vrednosti vsebnosti ozona iz vseh let spremljanja, združene po posameznih lokacijah.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

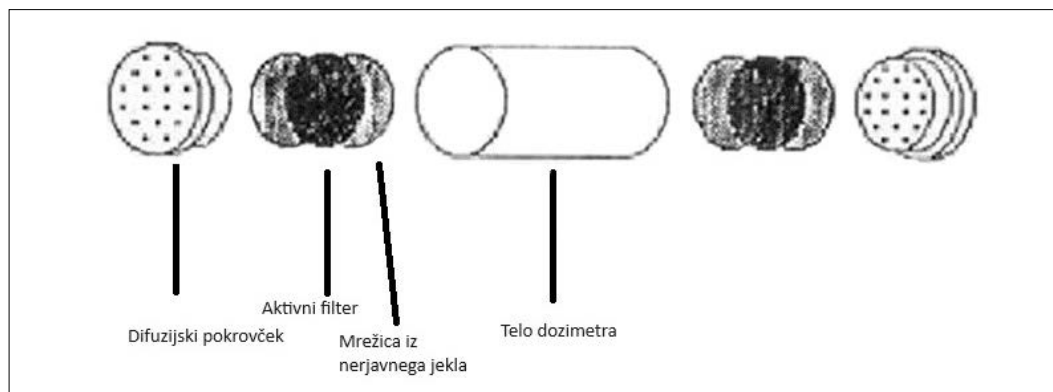
3 RESULTS AND DISCUSSION

Vsebnosti ozona v zraku na posamezni ploskvi so odvisne vsebnosti njegovih prekurzorjev v zračnih masah, ki pridejo nad Slovenijo z daljinskim transportom, vsebnosti samega ozona v njih in lokalnih klimatoliških pogojev, zaradi katerih ozon razpada ali dodatno nastaja. Vrh vsebnosti ozona zaradi daljinskega transporta (oz. njegovih

prekurzorjev) je ponavadi lepo viden konec junija oz. v začetku julija, ko na vseh ploskvah beležimo maksimalne vrednosti za posamezno leto, kar ustreza najvišjim ravnem UV sevanja. Drugi maksimum zaznamo v Sloveniji konec avgusta ali v začetku septembra.

Za najbolj obremenjeno z ozonom se je izkazala ploskev Borovec pri Kočevski Reki, saj je dolgoletno štirinajst-dnevno povprečje v rastnih sezonah $94 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$, s posameznimi maksimumi prek $160 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$. Sledita ji ploskev Lontovž nad Trbovljami in Tratice na Pohorju. Nekaj nižje vrednosti smo zasledili na dveh ploskvah na Primorskem - Fondek na Trnovski planoti in Gropajski bori pri Sežani. Kljub precejšnji razliki v nadmorski višini so vsebnosti ozona na teh dveh ploskvah primerljive in znašajo v povprečju okrog $81 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$. Še manjše vrednosti beležimo na ploskvi Brdo pri Kranju in Gorica pri Loškem Potoku (v povprečju 73 in $70 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$), sledijo ji Krucmanove konte na Pokljuki ($50 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$) ter dve ploskvi v nižinskih poplavnih gozdovih - Krakovski gozd in Murska šuma (35 in $38 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$).

Za primerjavo med večjimi gozdnimi sestoji in mestnim gozdom imamo ploskev, ki se nahaja ob Gozdarskem inštitutu Slovenije v Ljubljani. Kljub temu, da ploskev stoji na obrobju urbanega okolja, smo tu izmerili malenkost višje vrednosti kot na pokljuški planoti ($52 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$) (Slika 3). Na ploskvi, ki stoji sredi mestnega okolja pri sedežu ARSO v Ljubljani za Bežigradom, je bila izmerjena vrednost nekaj višja ($61 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$).

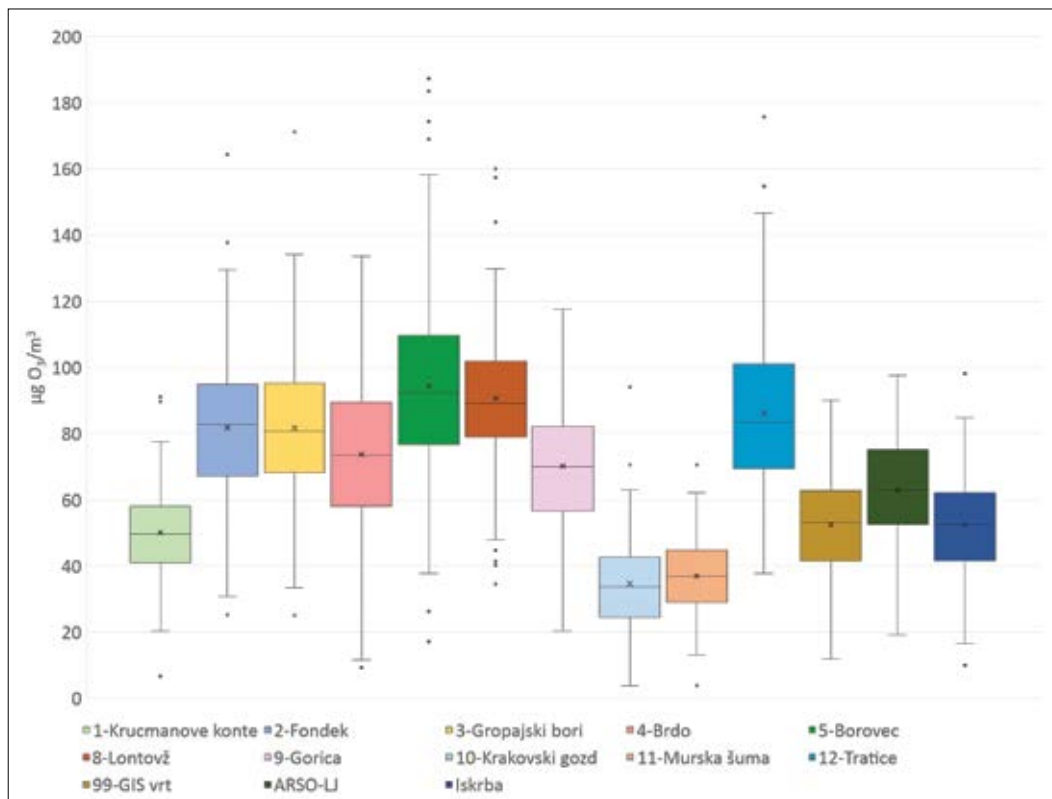


Slika 2: Shema dozimetra (povzeto po Koutrakis in sod., 1993)

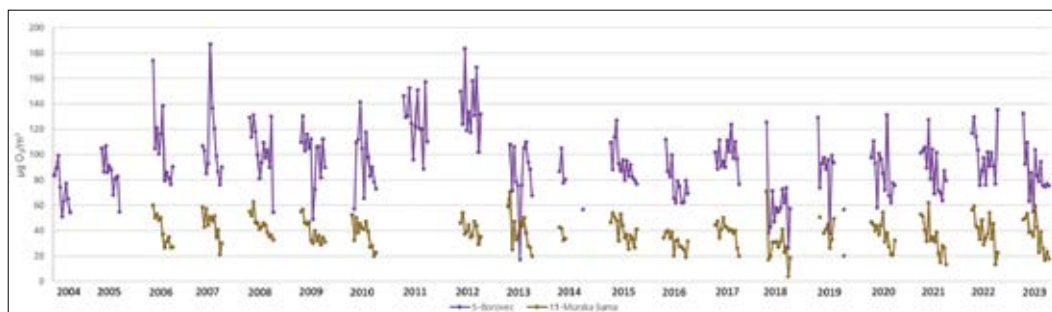
Figure 2: Dosimeter schematic (adapted from Koutrakis et al., 1993)

Primerjava 20-letnih gibanj vsebnosti ozona (Slika 4) med najbolj onesnaženo ploskvijo (5-Borovec) in drugo najmanj onesnaženo (11-Murska šuma) nam pokaže, da so vsebnosti ozona v Murski šumi konstantno nizke z nekaj oscilacijami tekom rastnih sezon (daljinski transport prekursorjev

ozona in ozona v kombinaciji z meteorološkimi pogoji), na Borovcu pa so ti odkloni veliko bolj izraziti, s trendom naraščanja do leta 2012 in so od leta 2013, ko so se vrednosti spustile na raven iz let 2004/2005, zopet v trendu naraščanja.



Slika 3: Združene vsebnosti ozona po posameznih ploskvah v vseh letih (glej sliko 1) spremljanja
Figure 3: Combined ozone concentrations by plot over all monitoring years (see Figure 1)



Slika 4: 20-letno sezonsko gibanje vsebnosti ozona na ploskvah 5-Borovec (vijolična) in 11-Murska šuma (rjava)
Figure 4: 20-year seasonal trends in ozone at plots 5-Borovec (purple) and 11-Murska šuma (brown)

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Spremljanje vsebnosti ozona v zraku s pasivnimi dozimetri se je izkazalo kot zelo učinkovita in ekonomsko sprejemljiva metoda. Njena slabost je nezmožnost detekcije posameznih dnevnih maksimumov, ki pa v 14-dnevno povprečje vseeno doprinesejo dovolj, da se jih lahko opazi. V dvajsetletnem spremljanju vsebnosti ozona v zraku na desetih ploskvah po Sloveniji smo ugotovili, da je z ozonom najbolj obremenjena ploskev na Borovcu (Kočevska Reka), sledita ji dve na višjih nadmorskih višinah (Lontovž - Kum, Tratice - Pohorje) ter dve primorski (Fondek, Gropajski bori). Ploskvi, najmanj obremenjeni z ozonom sta Krakovski gozd in Murska šuma, kjer uspevajo nižinski, poplavni gozdovi. Nihanja vsebnosti ozona so veliko bolj izrazita na lokacijah, kjer so vsebnosti visoke, z zelo izrazitim vrhom prav ob začetku vsakokratne rastne sezone.

5 ZAHVALA

5 ACKNOWLEDGEMENT

Meritve se še vedno izvajajo v okviru Intenzivnega monitoringa stanja gozdov v Sloveniji, ki je del EU programa ICP Forests. Raziskavo v okviru nalog Javne gozdarske službe GIS - JGS 1/3 (Intenzivno spremljanje vpliva onesnaženosti zraka na gozdove v skladu s Pravilnikom o varstvu gozdov in Konvencije UNECE CLRTAP) - podpira Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano RS, za kar se jim lepo zahvaljujemo. Zahvaljujemo se vsem revirnim gozdarjem - skrbnikom ploskev, ki so skozi leta izvajali in še izvajajo vzdrževanje infrastrukture na terenu in vzorčenje ter sodelavcem Laboratorija za gozdno ekologijo Gozdarskega inštituta Slovenije za pripravo, transport in analizo dozimetrov. Program je bil deloma izveden v okviru pripravljalnega projekta eLTER faze (eLTER PPP), projekta eLTER Advanced Community Project (eLTER PLUS) in projekta „Razvoj raziskovalne infrastrukture za mednarodno konkurenčnost slovenskega RRI prostora - RI-SI-LifeWatch, ki ga financira Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport ter Evropska unija iz Evropskega regionalnega Evropskega sklada za regionalni razvoj”.

6 VIRI IN LITERATURA

6 REFERENCES

- Agathokleous E., Feng Z., Saitanis C. J., 2022. Effects of Ozone on Forests. V: Akimoto, H., Tanimoto, H. (ur.) Handbook of Air Quality and Climate Change. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_24-1
- Ainsworth E. A., Yendrek C. R., Sitch S., Collins W. J., Emberson L. D., 2012. The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 637–661.
- Calatayud, V., Cervero, J., Calvo, E., Garcia-Breijo, F.J., Reig-Arminana, J., Sanz, M.J., 2011. Responses of evergreen and deciduous Quercus species to enhanced ozone levels. *Environ. Pollut.* 159, 55–63.
- Franz M., Alonso R., Arneth A., Büker P., Elvira S., Gerrosa G., Emberson L., Feng Z., Le Thiec D., Marzuoli R., Oksanen E., Uddling J., Wilkinson M., Zaehle S. 2018. Evaluation of simulated ozone effects in forest ecosystems against biomass damage estimates from fumigation experiments. *Biogeosciences*, 15, 6941–6957. <https://doi.org/10.5194/bg-15-6941-2018>.
- How is Ozone Formed? (b. l.) <https://scdhec.gov/environment/your-air/most-common-air-pollutants/about-ozone/how-ozone-formed> (8. 5. 2024)
- Koutrakis, P., Wolfson, J. M., Bunyaviroch, A., Froehlich, S. E., Hirano, K., Mulik, J. D. 1993. Measurement of ambient ozone using a nitrite-coated filter. *Analytical Chemistry*, 65: 209–214.
- Schaub M., Calatayud V., Ferretti M., Pitar D., Brunialti G., Lövblad G., Krause G., Sanz M. J. 2020. Part XV: Monitoring of air quality. Version 2020-1. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 11 p. + Annex [<http://www.icp-forests.org/manual.htm>]
- Stomatal Opening and Closure. (b. l.) [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/Botany_\(Ha_Morrow_and_Algers\)/04%3A_Plant_Physiology_and_Regulation/4.05%3A_Transport/4.5.01%3A_Water_Transport/4.5.1.02%3A_Transpiration/4.5.1.2.02%3A_Stomatal_Opening_and_Closure](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/Botany_(Ha_Morrow_and_Algers)/04%3A_Plant_Physiology_and_Regulation/4.05%3A_Transport/4.5.01%3A_Water_Transport/4.5.1.02%3A_Transpiration/4.5.1.2.02%3A_Stomatal_Opening_and_Closure) (28. 8. 2024)
- Wang B., Shugart H. H., Shuman J. K., Lerdau M. T. 2016. Forests and ozone: productivity, carbon storage and feedbacks. *Nature: Scientific Reports*, 6: 22133. <https://doi.org/10.1038/srep22133>
- Zhang J., Wei Y. in Fang Z. 2019. Ozone pollution: a major health hazard worldwide. *Frontiers in Immunology*. 10:2518. doi: 10.3389/fimmu.2019.02518