

PŘÍZEMNÍ OZON

IVA HŮNOVÁ^{a,b}

^a Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4, ^b Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí, Benátská 2, 120 00 Praha 2 hunova@chmi.cz

Došlo 4.10.17, přepracováno 13.2.18, přijato 22.2.18.

Klíčová slova: chemie atmosférická, ozon přízemní, monitoring, trendy časové, změny prostorové

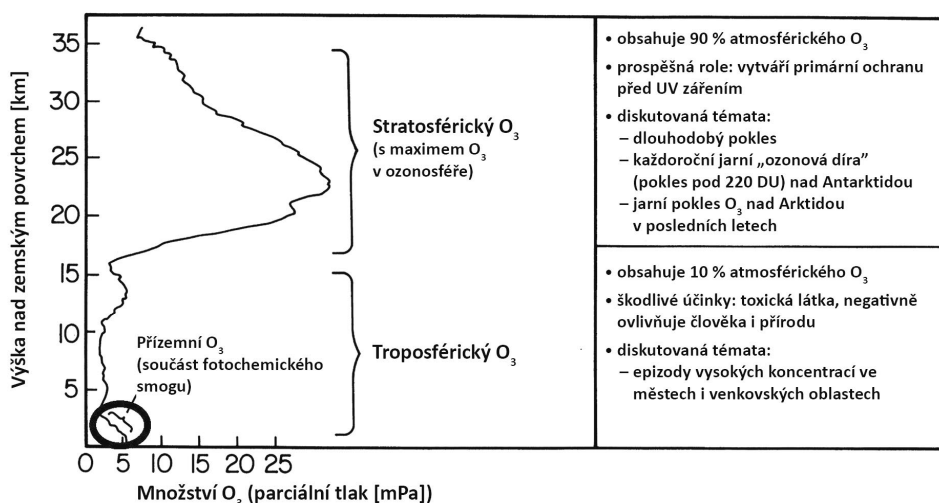
Obsah

1. Úvod
2. Vznik a zánik přízemního ozonu
3. Účinky přízemního ozonu
4. Jak se sleduje přízemní ozon v České republice
 - 4.1. Národní síť automatizovaného imisního monitoringu
 - 4.2. Měření difuzními dozimetry
5. Prostorová variabilita a časové trendy přízemního ozonu v České republice
6. Důsledky zvýšené expozice ozonu v České republice
7. Závěr

1. Úvod

Ozon (O_3) je plynem, který má v atmosféře klíčovou úlohu¹. Je silným oxidačním činidlem a současně zdrojem radikálu $OH\cdot$ s ještě silnějšími oxidačními účinky, díky nimž může být z atmosféry odstraňována celá řada látek oxidačními reakcemi^{2,3}. Vzhledem ke svým radiačně-absorpčním vlastnostem je současně O_3 i účinným skleníkovým plynem a jako takový významně přispívá ke klimatické změně⁴. Ozon podle oblasti výskytu v atmosféře (obr. 1) rozlišujeme na stratosférický a troposférický⁵. Stratosférický O_3 , který tvoří přibližně 90 % objemu celkového atmosférického O_3 , chrání biosféru před účinky nebezpečných složek UV záření, a je tedy pokládán jednoznačně za prospěšný. Ozon troposférický je naopak pokládán za škodlivý, protože negativně působí na lidské zdraví i ekosystémy a životní prostředí⁶. Atmosférická chemie O_3 v obou částech atmosféry se významným způsobem liší a ve stratosféře i troposféře se O_3 účastní rozdílných reakcí².

Součástí troposférického O_3 je přízemní O_3 , vyskytující se – jak název napovídá – v přízemní vrstvě atmosféry. Je klíčovou komponentou a indikátorem tzv. fotochemického smogu (synonymně letního či losangeleského), který je různorodou směsicí látek vznikajících v průběhu fotochemických reakcí, tedy reakcí probíhajících v přítomnosti slunečního záření⁷. Koncentrace přízemního O_3 vykazují významnou časovou a prostorovou variabilitu v důsledku působení celé řady faktorů, jako je zeměpisná



Obr. 1. Ozon v atmosféře (upraveno podle⁵), DU je Dobsonova jednotka, standardní způsob vyjádření množství O_3 v atmosféře Země (1 DU je rovna 0,01 mm O_3 za normálních atmosférických podmínek); Pa je Pascal, jednotka, ve které se měří v meteorologii tlak vzduchu (1 Pa je roven 1 N m⁻²)

poloha, nadmořská výška, umístění stanice, období roku a synoptická situace³. Koncentrace O₃ s rostoucí nadmořskou výškou zpravidla rostou a mohou se vzhledem k nadmořské výšce rychle měnit i na poměrně malou vzdálenost⁸. Chevalier a spol. ve své studii⁹ našli strmý gradient 60 μg m⁻³ km⁻¹ do nadmořské výšky přibližně 1000 až 1200 m n. m., a poté pozvolnější nárůst asi o 6 μg m⁻³ km⁻¹ pro západní Evropu v období 2001–2004. Pro úroveň koncentrací přízemního O₃ jsou velmi důležité meteorologické podmínky^{10,11}. Horké, slunečné, stabilní počasí vede ke vzniku O₃. Vysoká teplota, vysoká intenzita slunečního záření, nízká rychlost větru, nízká relativní vlhkost a absence atmosférických srážek jsou faktory, které jsou obecně pokládány za ideální podmínky pro fotochemický vznik O₃. Výsledky měření i matematického modelování naznačují existenci silné vazby mezi klimatickou změnou a úrovní přízemního O₃ (cit.¹²).

Přes dlouhodobé úsilí o snížení koncentrací O₃ v Evropě, Severní Americe a Japonsku, požadované koncentrace O₃ na severní polokouli naopak rostou¹³. Je to především důsledek rostoucího počtu obyvatelstva v jihovýchodní Asii, zejména v Číně, a s tím spojenými rostoucími antropogenními emisemi^{14–16}.

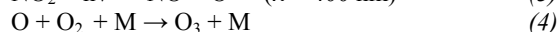
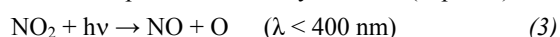
2. Vznik a zánik přízemního ozonu

Ozon nemá v atmosféře žádný významný emisní zdroj. Jedná se o tzv. sekundární látku, která v atmosféře vzniká z prekurzorů v celé řadě komplikovaných fotochemických reakcí silně nelineárního charakteru². Prekurzory O₃ jsou oxidy dusíku (NO_x) a nemethanické těkavé organické látky (NM VOC), v globálním měřítku hrají roli i methan a oxid uhelnatý.

Fotochemický vznik O₃ v troposféře byl prvně popsán až v padesátých letech 20. století významným americkým vědcem, Haagen-Smitem, který studoval znečištění ovzduší v Kalifornii¹⁷. Předtím se mělo za to, že O₃ v troposféře vzniká stejně tak jako ve stratosféře působením tzv. Chapmanových reakcí (1), (2), kde hv je sluneční záření a M katalyzátor:



Nicméně, protože fotony o vlnové délce kratší než 290 nm nejsou v troposféře přítomny, není možné, aby molekula O₂ byla tímto způsobem fotolyzována. Mechanismus troposférického vzniku O₃ spočívá ve fotolýze molekuly NO₂ slunečním zářením (hv) a následné rekombinaci vzniklého atomárního kyslíku O s molekulou O₂ na molekulu O₃ za přítomnosti katalyzátoru M (např. N₂):



Molekula oxidu dusnatého NO může reagovat s O₃, přičemž se znova vytvoří molekula NO₂.



Cyklus reakcí (3)–(5) vede k ustavení rovnovážného

stavu mezi NO, NO₂ a O₃ v atmosféře za přítomnosti slunečního záření, v časovém měřítku kolem 100 s. Ke zvýšení koncentrací O₃ dochází, je-li O₃ při zpětné oxidaci NO na NO₂ nahrazen těkavými organickými látkami. Dynamika následných chemických procesů je ovšem velmi složitá: závisí na vzájemném poměru koncentrací látek vstupujících do reakcí a na fyzikálních parametrech (teplota, sluneční záření), ovlivňujících rychlost chemických reakcí. Kromě O₃ vznikají při zmíněných fotochemických reakcích i látky další (jako např. nebezpečný peroxyacetylitrát (PAN), H₂O₂, aldehydy, řada radikálů s krátkou dobou setrvání), které tvoří fotochemický smog.

Kromě výše popsaného vzniku fotochemickými reakcemi, může O₃ vzniknout i při bouřce v důsledku elektrických výbojů, blesků; případně – při speciálních podmínkách – může dojít i k průniku ze stratosféry. Tyto cesty však mají význam spíše okrajový¹⁸.

Ozon je z atmosféry – kromě výše uvedené reakce s NO (5) – odstraňován mechanismem suché depozice, kdy dochází k navázání jeho molekul na nejrůznější typy receptorů (zemský povrch, povrch vegetace, apod.) či stomatárním tokem¹⁹, kdy se dostává z atmosféry průduchy (stomaty) do rostlinných organismů, které pak může v důsledku zvýšené vnitřní expozice poškozovat. Účinně je z ovzduší odstraňován i atmosférickými srážkami.

3. Účinky přízemního ozonu

Ozon je silným oxidačním činidlem a jako takový velmi negativně působí na zdraví, vegetaci a ekosystémy, i na materiály. Jedná se o plyn, u něhož je rozdíl mezi aktuálními koncentracemi běžně se v ovzduší vyskytujícími a koncentracemi toxickými zanedbatelnými²⁰.

Podle pravidelného hodnocení Evropské agentury pro životní prostředí (European Agency for Environment, EEA) se sídlem v dánské Kodani je O₃ – vzhledem k dosahovaným imisním koncentracím, častému překračování imisních limitů, rozsahu území a procentu populace pod vlivem zvýšené expozice – spolu s aerosolem vůbec nejzávažnější škodlivinou ve venkovním ovzduší²¹. V Evropě jsou kritické hodnoty pro O₃ permanentně překračovány na rozsáhlém území²¹. Podle celé řady epidemiologických studií je expozice O₃ spojena s mírným, ale přesvědčivým zvýšením relativního rizika úmrtnosti²². Ukazuje se, že zdravotní účinky O₃ nastávají již pod hranicí 120 μg m⁻³, tedy pod dříve navrhovanou směrnou hodnotou²³, ale zatím nelze jasně identifikovat bezpečnou prahovou hodnotu²². Též se ukázalo, že u O₃ existuje vysoká individuální variabilita v účincích. Proto Světová zdravotnická organizace (WHO) navrhl snížit směrnou hodnotu pro denní maximální osmihodinovou průměrnou koncentraci z původních 120 až na 100 μg m⁻³ (cit.²²). Těto hodnoty je ovšem v reálných podmínkách velmi obtížné dosáhnout²¹.

Kromě lidského zdraví O₃ poškozuje i vegetaci a ekosystémy^{24,25}. Zvýšené koncentrace O₃ jsou spolu s atmosférickou depozicí dusíku²⁶ pokládány v současnosti

za vůbec největší ohrožení lesů²⁷. Fytotoxické účinky přízemního O₃ byly poprvé zaznamenány už v 50. letech minulého století v pohorí San Bernardino v jižní Kalifornii²⁸ a od té doby jsou předmětem rozsáhlého a intenzivního výzkumu. Působení O₃ na vegetaci je popsáno na nejrůznějších úrovních: biochemické, buněčné, fyziologické²⁹, na úrovni druhu i společenstva³⁰. Účinky jsou prokázány při běžně se vyskytujících imisních koncentracích. Negativní působení O₃ je patrné zejména v horských ekosystémech. Tam jsou koncentrace O₃ zvláště vysoké a navíc se tam vyskytují i druhy citlivé vůči stresu; je tam i dostatečná vlhkost, takže stomatární tok O₃ z okolního ovzduší do rostliny není omezován uzavíráním průduchů³¹. Právě proto též bývá monitoring O₃ a jeho vlivu na vegetaci často směřován do horských oblastí na horské ekosystémy^{32–34}.

4. Jak se sleduje přízemní ozon v České republice

4.1. Národní síť automatizovaného imisního monitoringu

V ČR se začalo s monitoringem O₃ až v r. 1993, tedy značně později než např. se sledováním tzv. „klasických“ škodlivin, jako SO₂, NO_x a aerosol. V současné době se měří na ca 50 stanicích, které reprezentují různá prostředí: města, venkovské prostředí, hory. Sledování O₃ má ve své gesci Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) a měření je prováděno kontinuálně v rámci provozování národní monitorovací sítě³⁵. Koncentrace O₃ se měří metodou UV-absorbance, která je deklarována evropskou legislativou jako metoda referenční, naměřená data podléhají systematické kontrole a verifikaci v rámci systému QA/QC (Quality Assurance/Quality Control) podle směrnice 2008/50/EC (cit.³⁶). Naměřené koncentrace jsou ukládány jako průměrné hodinové hodnoty v databázi Informačního systému kvality ovzduší (ISKO) ČHMÚ a slouží jako vstupní údaje pro nejruznější analýzy a studie. Pravidelným výstupem je každoroční hodnocení v rámci tzv. grafické ročenky ČHMÚ, kde je hodnocení znečištění ovzduší za předcházející kalendářní rok prezentováno formou národních grafů a map. Tyto výstupy jsou publikovány

v české i anglické verzi a jsou zájemcům volně k dispozici na portálu ČHMÚ.

Základem hodnocení je sledování překročení imisních limitů (tab. I), které jsou dány legislativou ČR (zákon č. 201/2012 Sb. v platném znění³⁷). Na rozdíl od minulosti jsou v „porevoluční legislativě“ kromě limitů pro ochranu zdraví též stanoveny limity pro ochranu vegetace a ekosystémů³⁸. Hodnoty imisních limitů jsou stanoveny v souladu s legislativou Evropské Unie (Směrnice 2008/50/ES, cit.³⁶) a jejich odborným podkladem jsou tzv. „směrné hodnoty“²² navržené na základě současného stupně vědeckého poznání organizací WHO.

Kromě každoročního hodnocení stavu znečištění slouží data i k hodnocení dlouhodobých časových trendů a prostorových změn v koncentracích a k hledání souvislostí mezi zvýšenými koncentracemi přízemního O₃ a zdravotními účinky³⁹ či dopady environmentálními^{40,41}.

4.2. Měření difuzními dozimetry

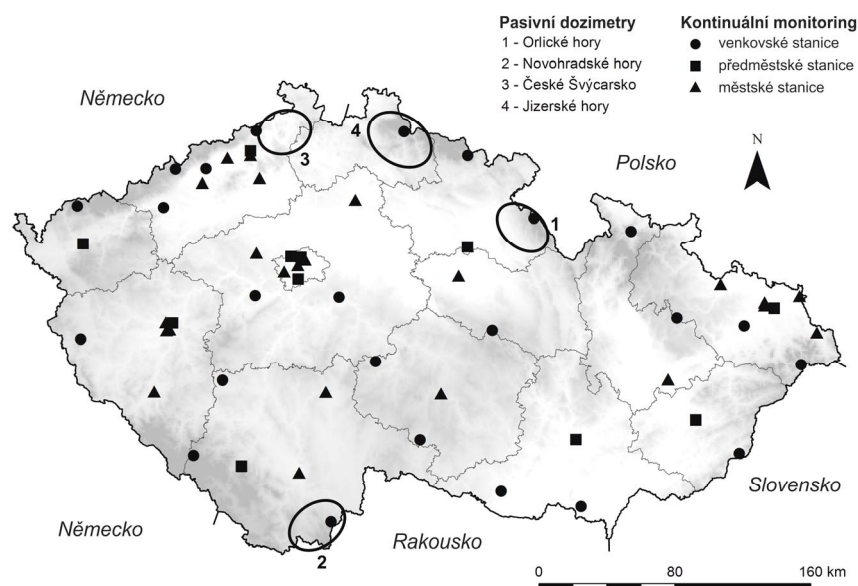
Monitorovací síť čítající přibližně 50 stanic (obr. 2) je víceméně dostatečná pro analýzy v rámci celorepublikového měřítka. Chceme-li však jít do měřítka podrobnějšího, např. zkoumat prostorovou variabilitu koncentrací O₃ v jednom pohorí, např. na Šumavě, je potřeba stávající páteřní síť automatického monitoringu doplnit dalším podpurným systémem měření. Z tohoto hlediska se jeví jako velmi vhodné tzv. pasivní či difuzní dozimetry, které jsou mnohem méně nákladné než automatizované měření, nepotřebují žádný zdroj energie, protože pracují na principu prosté difuze, jednoduše se s nimi manipuluje a přinášejí spolehlivé výsledky. Určitým nedostatkem je fakt, že získáváme nikoliv okamžité, ale průměrné koncentrace za delší časové období (obvykle 1–2 týdny). Výhody však značně převažují nad nedostatky a pro indikativní měření jsou velmi vhodné. Z tohoto důvodu se doporučují zejména pro environmentální studie⁴² a používají se jako kompletní systém měření automatizovaným sítím po celém světě^{43–46}. Stále však existuje řada nejistot, které je potřeba při použití pasivních dozimetrů řešit⁴⁷. Navíc v reálných podmínkách, např. v horském lese, je nezbytné zohlednit velmi variabilní environmentální podmínky (např. vítr, teplotu vzduchu a relativní vlhkost), které mohou mít na funkci pasivních dozimetrů značný vliv⁴⁸.

Tabulka I

Imisní limity O₃ pro ochranu zdraví a vegetace a ekosystémů (dle zákona č. 201/2012 Sb. v platném znění³⁷)

Účel vyhlášení	Charakteristika	Doba průměrování	Hodnota imisního limitu
Ochrana zdraví	koncentrace O ₃	maximální denní klouzavý osmihodinový průměr	120 µg m ⁻³
Ochrana vegetace a ekosystémů	expoziční index AOT40 ^a	výpočet z hodinových hodnot v období květen–červenec ^a	18 000 µg m ⁻³ h průměr za 5 let

^a AOT40 znamená součet rozdílů mezi hodnotou větší než 80 µg m⁻³ (40 ppb) a hodnotou 80 µg m⁻³ v dané periodě pro průměrné hodinové koncentrace změřené v období 8:00 a 20:00 SEČ



Obr. 2. Měření ozonu v ČR, kontinuální monitoring koncentrací v rámci automatizovaného imisního monitoringu (AIM) ČHMÚ, doplněný účelovým měřením pasivními dozimetry

V současné době je komerčně dostupná celá řada typů pasivních dozimetrů pro měření O_3 . Gerboles a spol.⁴⁹ při srovnávacím měření dostupných pasivních dozimetrů⁴⁹ pro měření koncentrací O_3 (Ogawa, Analyst, Radiello, IVL badge, Palmes tubes, Passam tubes, Passam badge) provedeném v laboratoři i v terénu zjistili, že většina z nich je vhodná pro měření týdenní expozice a splňuje požadavky 30% správnosti měření požadované evropskou legislativou⁵⁰.

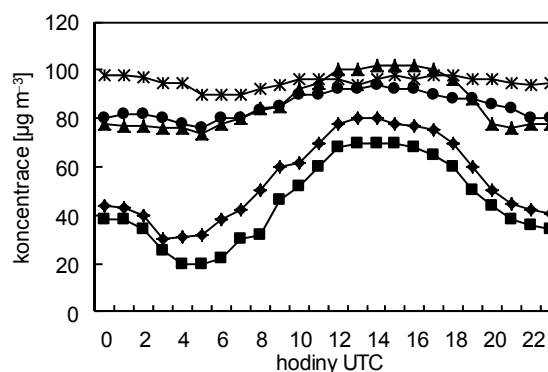
V našich měřeních v ČR byly použity pasivní dozimetry Ogawa (Ogawa & Co., Pompano Beach, Florida), které byly prověřeny již dříve při dlouhodobém měření O_3 v národních parcích USA i při rozsáhlém měření v Karpatech^{51–53}. Podle studie⁵⁴ Koutrakise a spol., kteří validovali měření tímto typem dozimetru, bylo zjištěno, že relativní vlhkost v rozmezí 10–80 % a teplota vzduchu v rozmezí 0–40 °C neovlivňuje funkci dozimetru při běžných koncentracích O_3 (80–200 $\mu\text{g m}^{-3}$). Difuzními dozimetry Ogawa byly koncentrace měřeny v horských lesích (obr. 2) chráněné krajinné oblasti Orlické hory, Novohradské hory, národního parku České Švýcarsko a chráněné krajinné oblasti Jizerské hory^{55,56}. Zkušenosti z desetiletého měření jsou shrnuty v článku⁵⁷. Detailní seznámení s principem fungování pasivních dozimetrů Ogawa je uvedeno např. v článku⁵⁸.

5. Prostorová variabilita a časové trendy přízemního ozonu v České republice

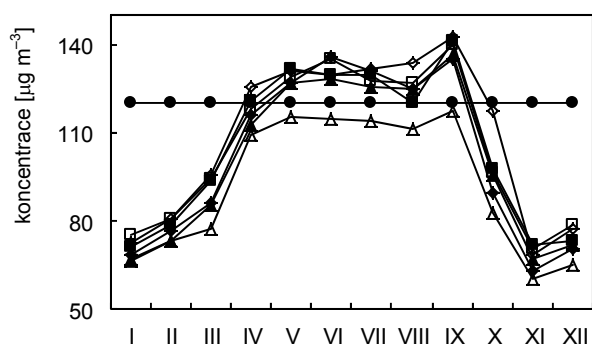
Ukazuje se, že koncentrace O_3 bývají vysoké v oblastech, které se z hlediska ostatních znečišťujících látek, jako

např. aerosol (particulate matter, PM), SO_2 a NO_x , pokládají za „čisté“⁵⁹.

Denní chod koncentrací O_3 se liší podle typu lokality v závislosti na faktorech ovlivňujících tvorbu O_3 , jeho přenos a rozklad (ráno trvá určitou dobu, než dojde k rozvinutí fotochemických procesů). Denní chod je mnohem výraznější na městských lokalitách, charakterizovaných zvonovitou křivkou, než na stanicích vzdálených od emisních zdrojů prekurzorů ozonu, kde je průběh křivky spíše plošší (obr. 3). Koncentrace O_3 ve venkovských oblastech položených ve vyšší nadmořské výšce nevykazují tak výrazný denní chod s typickým maximem v odpoledních hodinách a velkými rozdíly mezi denními



Obr. 3. Denní chod koncentrací O_3 (UTC, Universal Time Coordinated, Světový čas); ◆ Tušimice, ■ Bilina, ▲ Souš, * Krkonoše - Rýchory, ● Rudolice v Horách



Obr. 4. Roční chod koncentrací O_3 ; □ venkovské, ▲ předměstské, ◆ městské, Δ dopravní, ■ průmyslové, ◇ regionální lokality, —●— limit (max. 8h klouzavý průměr)

a nočními hodnotami jako stanice městské či stanice regionální ležící ovšem v impaktních oblastech. Důvodem je fakt, že NO má relativně krátkou dobu setrvání v ovzduší a v relativně čistých venkovských oblastech, vzdálených od emisních zdrojů NO, nedochází k rozkladu O_3 oxidem dusnatým. O_3 je v těchto oblastech z ovzduší odstraňován (v období bez srážek) především pouze pomalým fyzikálním procesem suché depozice.

Ozon je typickou letní škodlivinou s vyššími imisními koncentracemi v letním období, tedy mezi začátkem dubna a koncem září, a nižšími naopak v období zimním (obr. 4). Sezónní chod je ovlivněn zejména změnami meteorologických procesů.

Imisní limity pro ochranu zdraví i vegetace (tab. I) jsou v ČR pravidelně překračovány. Např. za poslední hodnocené období 2013–2015 byl imisní limit pro ochranu zdraví překročen na 27 % území s přibližně 9,5 % obyvatel. Imisní limit pro ochranu vegetace byl překročen na 5 (Štítná nad Vláří, Kuchařovice, Mikulov-Sedlec, Tobolka-Čertovy Schody a Červená hora) z celkového počtu 35 venkovských a předměstských stanic, pro které je tento limit závazný³⁵.

6. Důsledky zvýšené expozice ozonu v České republice

Expozice O_3 je v ČR relativně vysoká^{40,41} a může mít negativní důsledky pro lidské zdraví³⁸ a vegetaci^{55,60}. Např. ve studii zkoumající vliv koncentrací O_3 na úmrtnost a hospitalizace v období 2006–2010 bylo zjištěno, že expozice O_3 v Praze, přestože je nižší než v jiných velkých městech Evropy, je dost vysoká na to, aby zvýšila relativní riziko úmrtnosti na choroby dýchacích cest³⁹. Přitom vliv zvýšených koncentrací O_3 dále umocňují další spolupůsobící stresové faktory, jako např. „vlny vedra“⁶¹, jejichž frekvence výskytu se s pokračující změnou klimatu zvyšuje i u nás.

Co se týká vlivu na vegetaci, výsledky poškození nejsou tak zřejmé, protože na rozdíl od člověka, který musí dýchat stále, mají rostliny možnost regulovat příjem plynů z ovzduší, a tedy i O_3 , uzavíráním stomat. To se děje např. za nepříznivých stanovištních podmínek, např. je-li sucho. Zajímavou skutečností tak je fakt, že ačkoliv fytotoxický potenciál vyjádřený expozičním indexem AOT40 je v ČR vysoký⁴¹, a zejména v oblastech horských lesů srovnatelných s nejexponovanějšími regiony v Evropě (např. jižními svahy Alp, které jsou vystaveny vysokému imisnímu zatížení z emisních zdrojů v Páderské nížině), skutečná poškození, která je možná připsat působení O_3 , jsou relativně malá^{62,63}. Na tento rozpor poukazují i autoři z jiných částí Evropy⁶⁴ a zatím není jasné, jak ho vysvětlit.

7. Závěr

Závěrem je možné konstatovat, že přízemní O_3 je znečišťující látkou, která si rozhodně zaslouží odbornou pozornost a jejíž případné negativní dopady na lidské zdraví i ekosystémy je potřeba pečlivě studovat i v rámci probíhající globální změny⁶⁵.

Autorka děkuje paní Petře Tiché za vytvoření obrázků.

LITERATURA

- Monks P. S. a 62 spoluautorů: *Atmos. Environ.* 43, 5268 (2009).
- Seinfeldt J. H., Pandis S. N.: *Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change*. J. Wiley, New York 1998.
- Finlayson-Pitts B. J., Pitts J. N. Jr.: *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academia Press, San Diego 2000.
- IPCC: *Climate Change 2007. Synthesis Report*. IPCC, Geneva 2007.
- Singh O. N., Fabian P.: *Atmospheric Ozone: a Millennium Issue*. Copernicus GmbH, Katlenburg-Lindau 2003.
- Royal Society: *Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications*. Royal Society, London 2008.
- Braniš M., Hůnová I. (ed.): *Atmosféra a klima. Aktuální otázky ochrany ovzduší*. Karolinum, Praha 2009.
- Brodin M., Helmig D., Oltmans S.: *Atmos. Environ.* 44, 5305 (2010).
- Chevalier A., Gheusi F., Delmas R., Ordóñez C., Sarrazat C., Zbinden R., Thouret V., Athier G., Cousin J.-M.: *Atmos. Chem. Phys.* 7, 4311 (2007).
- Austin E., Zanobetti A., Coull B., Schwartz J., Gold D., Koutrakis P.: *J. Expo. Environ. Epidemiol.* 25, 532 (2015).
- Thompson M. L., Reynolds J., Cox L. H., Guttorp P., Sampson P. D.: *Atmos. Environ.* 35, 617 (2001).

12. Solberg S., Derwent R. G., Hov Ø., Langner J., Linskog A.: *Ambio* 34, 47 (2005).
13. Derwent R. G., Stevenson D. S., Collins W. J., Johnson C. E.: *Atmos. Environ.* 38, 1891 (2004).
14. Ma Z., Xu J., Quan W., Zhang Z., Liu W., Xu X.: *Atmos. Chem. Phys.* 16, 3969 (2016).
15. Granier C. a 24 spoluautorů: *Clim. Change* 109, 163 (2011).
16. Wang T., Xue L., Brimblecombe P., Lam Y. F., Li L., Zhang L.: *Sci. Total Environ.* 575, 1582 (2017).
17. Haagen-Smit A. J.: *Ind. Eng. Chem.* 44, 1342 (1952).
18. Griffing G. W.: *J. Geophys. Res.* 82, 943 (1977).
19. Emberson L. D., Ashmore M. R., Cambridge H. M., Simpson D., Tuovinen J.-P.: *Environ. Pollut.* 109, 403 (2000).
20. Stanners D., Bourdeau P. (ed.): *Europe's Environment: The Dobříš Assessment*. European Environment Agency, Copenhagen 1995.
21. EEA: *Air quality in Europe – 2016 report*. European Environment Agency, Luxembourg 2016.
22. WHO: *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005*. WHO, Geneva 2006.
23. WHO: *Air quality guidelines for Europe*. WHO, Geneva 2000.
24. Agrawal S. B., Agrawal M. (ed.): *Environmental Pollution and Plant Responses*. CRC Press, Boca Raton 1999.
25. Roschina V. V., Roschina V. D.: *Ozone and Plant Cell*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2003.
26. Hůnová I.: *Chem. Listy* 110, 779 (2016).
27. Paoletti E., Schaub M., Matyssek R., Wieser G., Augustaitis A., Bastrup-Birk A. M., Bytnerowicz A., Günthardt-Goerg M. S., Müller-Starck G., Serengil Y.: *Environ. Pollut.* 158, 1986 (2010).
28. Miller P. R., Parmeter J. R., Taylor O. C., Cardiff E. A.: *Phytopathology* 53, 1070 (1963).
29. Long S. P., Naidu S. L., v knize: *Air Pollution and Plant Life* (Bell J. N. B., Treshow M., ed.), kap. 5. J. Wiley, Chichester 2002.
30. Ashmore M. R., v knize: *Air Pollution and Plant Life* (Bell J. N. B., Treshow M., ed.), kap. 6. J. Wiley, Chichester 2002.
31. Matyssek R., Bytnerowicz A., Karlsson P.-E., Paoletti E., Sanz M., Schaub M., Wieser G.: *Environ. Pollut.* 146, 587 (2007).
32. Puxbaum H., Gabler K., Smidt S., Glattes P.: *Atmos. Environ.* 25, 1756 (1991).
33. Aneja V., Li Z., Das M.: *Chemosphere* 29, 1711 (1994).
34. Bytnerowicz A., Arbaugh M., Schilling S., Fraczek W., Alexander D., Dawson P.: *Sci. World J.* 7, 98 (2007).
35. ČHMÚ: *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2014*. ČHMÚ, Praha 2016.
36. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, OJEC L 152.
37. Zákon č. 201/2012 Sb. *O ochraně ovzduší*. Sbírka zákonů 2012, částka 69, str. 2786.
38. Hůnová I.: *Ochrana ovzduší* 15 (35), 4 (2003).
39. Hůnová I., Malý M., Řezáčová J., Braniš M.: *Int. Arch. Occ. Env. Hea.* 86, 89 (2013).
40. Hůnová I., Livorová H., Ostatnická J.: *Ecol. Indic.* 3, 35 (2003).
41. Hůnová I., Schreiberová M.: *iForest* 5, 153 (2012).
42. Krupa S. V., Legge A. H.: *Environ. Pollut.* 107, 31 (2000).
43. Adon M. a 15 spoluautorů: *Atmos. Chem. Phys.* 10, 7467 (2010).
44. Grosjean D., Williams II E. L., Grosjean E.: *Environ. Pollut.* 88, 267 (1995).
45. Helaleh M. I. H., Ngudiwaluyo S., Korenaga T., Tanaka K.: *Talanta* 58, 649 (2002).
46. Sanz M. J., Calatayud V., Sanchez-Pena G.: *Environ. Pollut.* 145, 620 (2007).
47. Cox R. M.: *Environ. Pollut.* 126, 301 (2003).
48. Vardoulakis S., Lumberras J., Solazzo E.: *Atmos. Environ.* 43, 2509 (2009).
49. Gerboles M., Buzica D., Amantini L., Lagler F.: *J. Environ. Monit.* 8, 112 (2006).
50. Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of 12 February 2002 relating to ozone in ambient air. OJEC 67: 14–30.
51. Cooper S. M., Peterson D. L.: *Environ. Pollut.* 107, 339 (2000).
52. Manning W. J., Krupa S. V., Bergweiler C. J., Nelson K. I.: *Environ. Pollut.* 91, 399 (1996).
53. Bytnerowicz A., Godzik B., Grodzińska K., Fraczek W., Musselman R., Manning W., Badea O., Popescu F., Fleischer P.: *Environ. Pollut.* 130, 5 (2004).
54. Koutrakis P., Wolfson J. M., Bunyarovich A., Froelich S. E., Koichiro H., Mulik J. D.: *Anal. Chem.* 65, 209 (1993).
55. Hůnová I., Matoušková L., Srněnský R., Koželková K.: *Environ. Monit. Assess.* 183, 501 (2011).
56. Hůnová I., Stoklasová P., Schovánková J., Kulasová A.: *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 377 (2016).
57. Hůnová I.: *Eur. J. Environ. Sci.* 7, 125 (2017).
58. Hůnová I.: *Ochrana ovzduší* 19 (38), 8 (2006).
59. Hůnová I.: *Sci. Total Environ.* 303, 245 (2003).
60. Vlasáková-Matoušková L., Hůnová I.: *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 10034 (2015).
61. Hůnová I., Brabec M., Malý M., Knobová V., Braniš M.: *Air Qual., Atmos. Health* 10, 183 (2017).
62. Šrámek V., Novotný R., Vejpustková M., Hůnová I., Uhlířová H.: *J. Environ. Monitor.* 14, 1696 (2012).
63. Hůnová I., Novotný R., Uhlířová H., Vráblík T., Horálek J.: *Environ. Pollut.* 158, 2393 (2010).
64. Gottardini E., Cristofolini F., Cristofori A., Ferretti M.: *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 8206 (2018).
65. Brasseur G. P., Prinn R. G., Pszenny A. P. (ed.): *Atmospheric chemistry in a changing world*. Springer-Verlag, Berlin 2003.

I. Hůnová^{a,b} (^a *Czech Hydrometeorological Institute, Prague*, ^b *Charles University in Prague, Faculty of Science, Institute for Environmental Studies*): **Ambient Ozone**

Ozone plays a key role in the atmosphere and participates in numerous important chemical reactions. Apart from the atmospheric chemistry, ozone is also an important green-house gas, contributing significantly to climate change. The paper is focused on ambient (ground-level, surface) ozone (O₃), which is considered, together with

aerosol, to be currently the most dangerous ambient air pollutant. The formation and depletion of O₃ in the atmosphere, as well as its impacts are explained. Moreover, the O₃ monitoring in the Czech Republic, and spatial variability and time trends of its concentrations are presented, and impacts of elevated exposures in the Czech Republic are indicated.

Keywords: atmospheric chemistry, surface ozone, monitoring, time trends, spatial changes