

## IV.4 Přízemní ozon

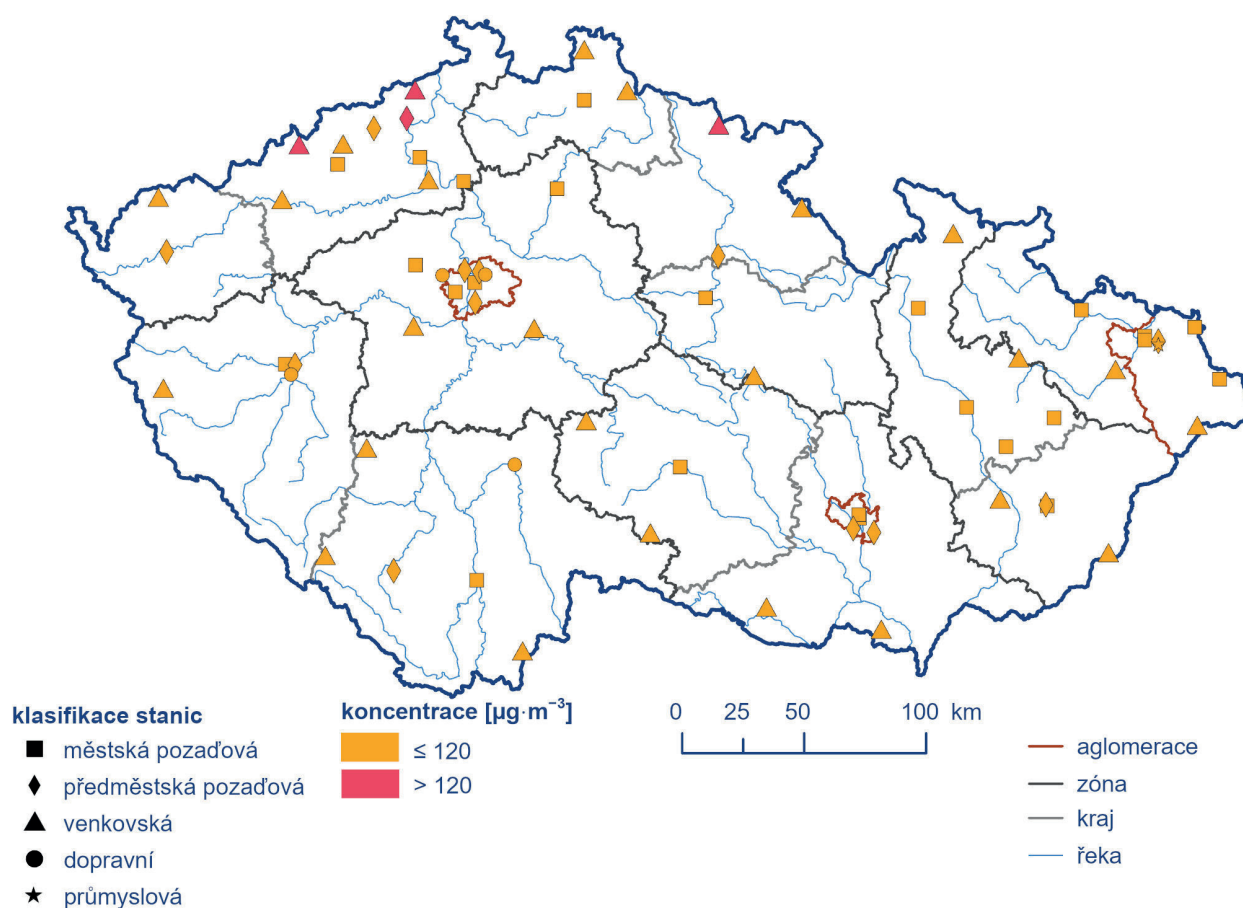
### IV.4.1 Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2021

#### Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2021 vzhledem k imisním limitům pro ochranu lidského zdraví

Imisní limit přízemního ozonu ( $O_3$ ) byl za tříleté období 2019–2021<sup>1</sup> překročen pouze na 4 ze 65 stanic (6 %), na kterých byly koncentrace  $O_3$  měřeny (Obr. IV.4.1 a IV.4.2). Jednalo se o tři regionální stanice (Krkonoše-Rýchory, Rudolice v Horách, Sněžník) a jednu pozadovou předměstskou stanici (Ústí n. L.-Kočkov). Za předchozí tříleté období 2018–2020 byl imisní limit přízemního  $O_3$  překročen na 34 z 67 stanic (51 %), za období 2017–2019 na 36 z 64 stanic (56 %), za období 2016–2018 na 33 z 65 (51 %) a za období 2015–2017 na 21 z 71 (30 %).

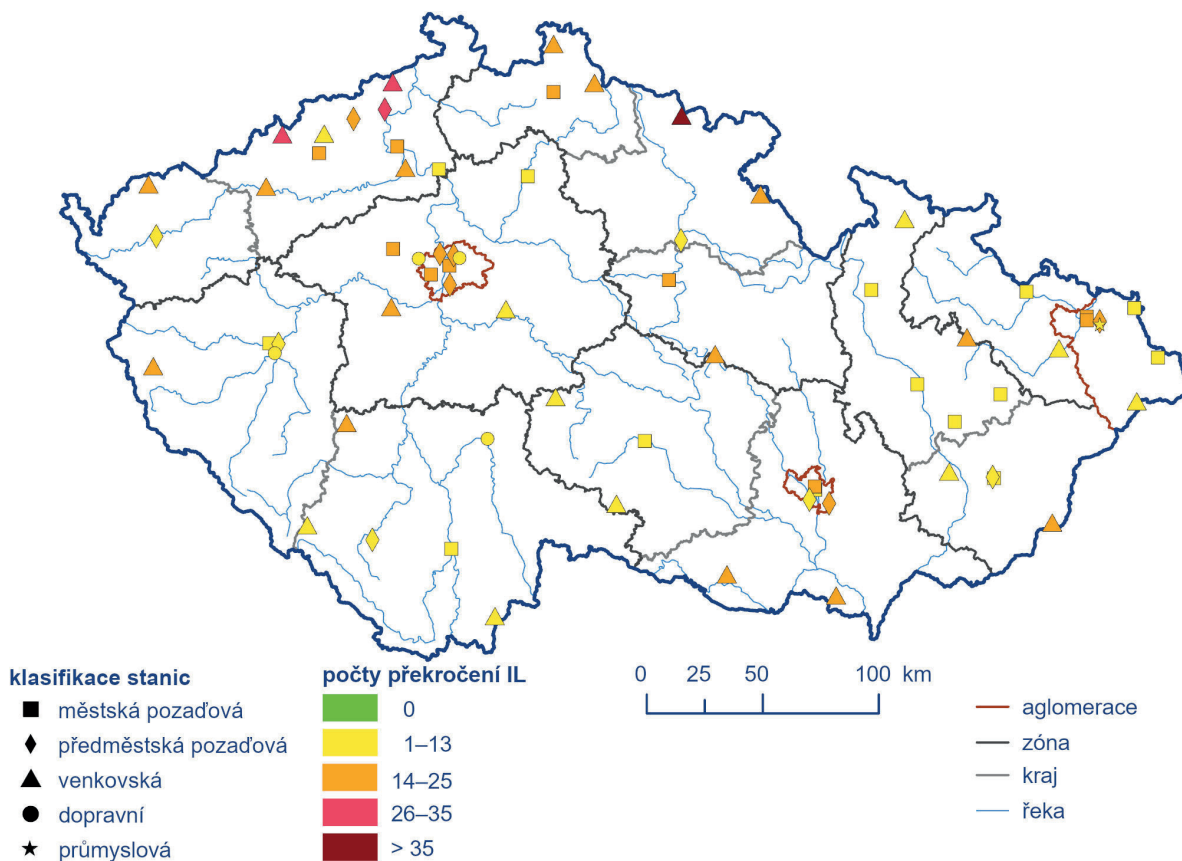
K překročení imisního limitu  $O_3$  došlo ve tříletém období 2019–2021 na pouhých 0,2 % území ČR s 0,02 % obyvatel (Obr. IV.4.3). V porovnání s předchozími tříletými obdobími (62 % území s 52 % obyvatel za období 2018–2020, 71 % území s 57 % obyvatel za období 2017–2019, 80 % území s 52 % obyvatel za období 2016–2018 a 31 % území s 9 % obyvateli za období 2015–2017) byl imisní limit pro  $O_3$  překročen na nejmenším území s nejnižším podílem obyvatel. V rámci jednotlivých let za období 2019–2021 došlo na téměř 70 % stanic v roce 2021 k nejnižšímu počtu překročení hodnoty imisního limitu (Obr. IV.4.4). Pro přízemní  $O_3$  nebyla v roce 2021 vyhlášena žádná smogová situace (více viz kap. VI).

Roční chod průměrných měsíčních koncentrací přízemního  $O_3$  (maximální 8hodinový průměr za daný měsíc) je charakterizován nárůstem koncentrací v jarních a letních měsících z důvodu výskytu příznivých meteorologických podmínek (vysoká intenzita slunečního záření, vysoké teploty, nižší vlhkost vzduchu) pro vznik přízemního  $O_3$  (Obr. IV.4.5). Nejvyšší koncentrace  $O_3$  byly v roce 2021 naměřeny v červnu, tedy v nejteplejším měsíci roku 2021.

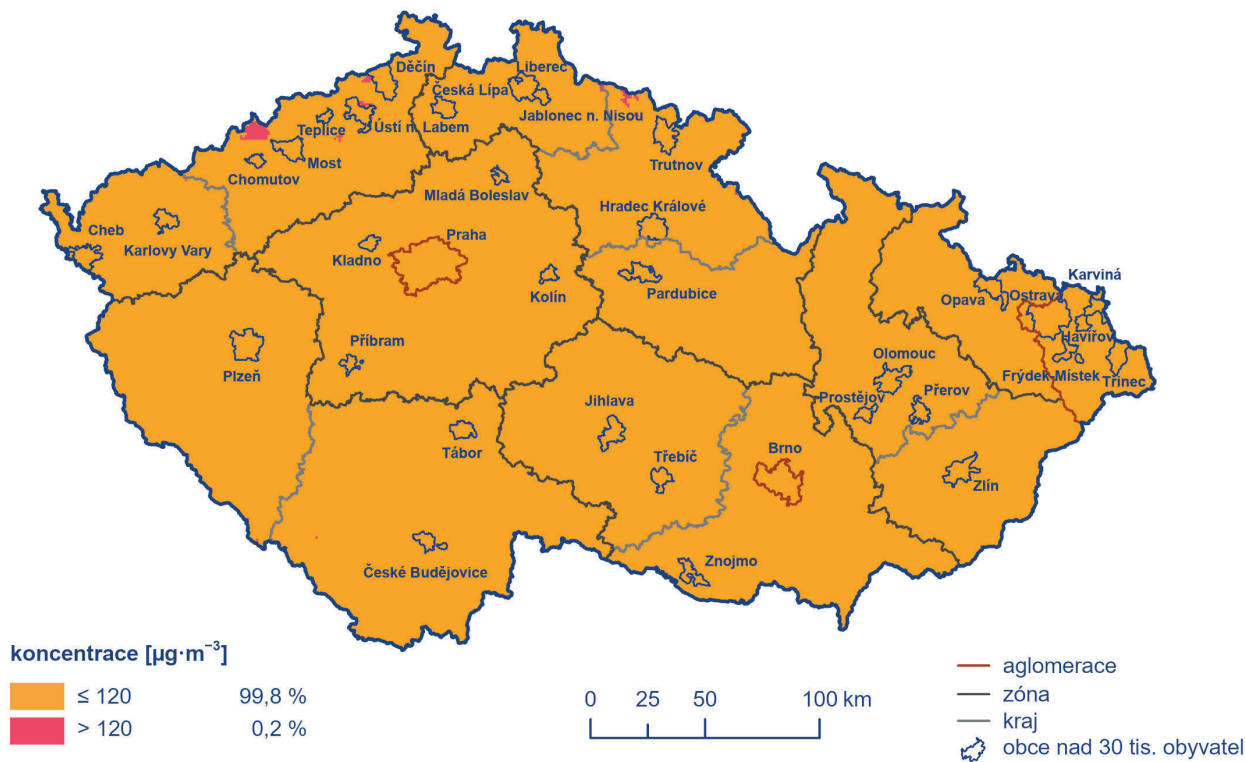


Obr. IV.4.1 26. nejvyšší hodnoty maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrací přízemního  $O_3$  v průměru za 3 roky měřené na stanicích imisního monitoringu, 2019–2021

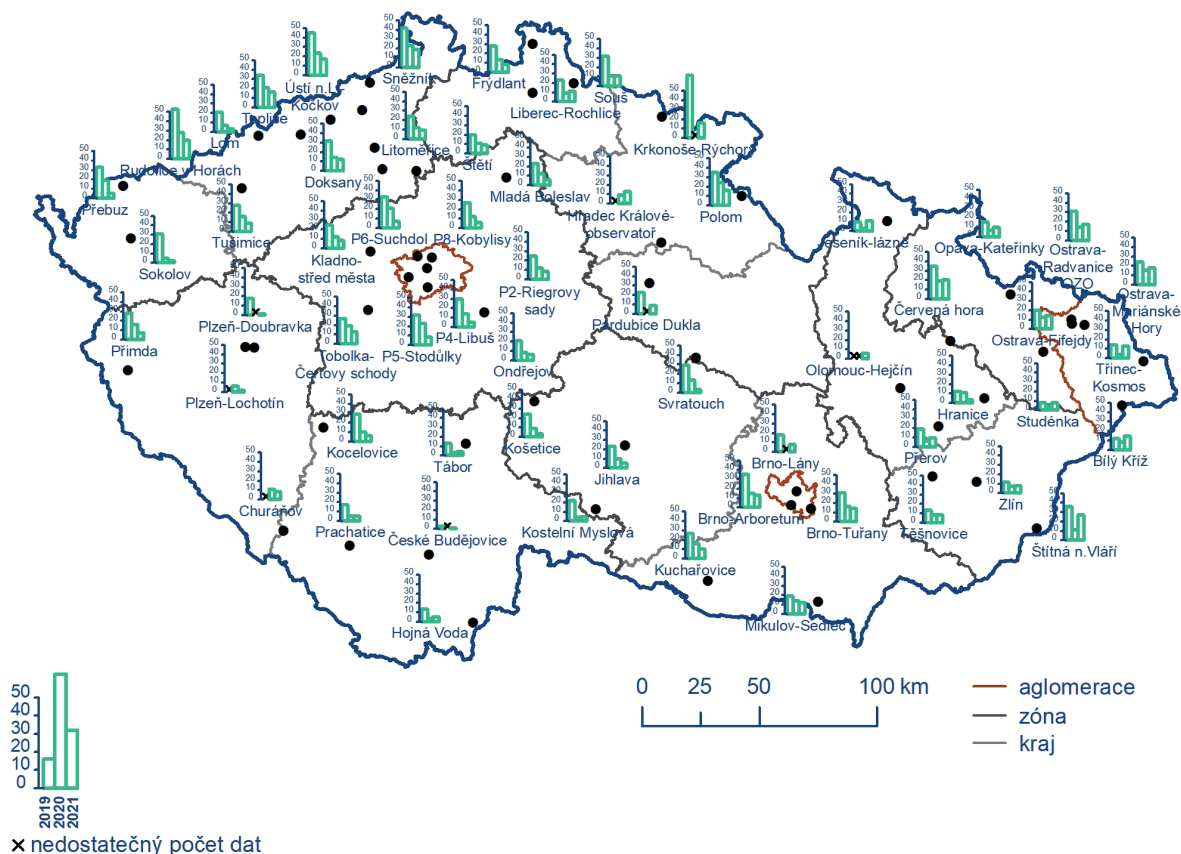
1 Imisní limit je překročen, jestliže byl maximální denní 8hodinový klouzavý průměr  $O_3$  vyšší než  $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  alespoň 26× v průměru za 3 roky



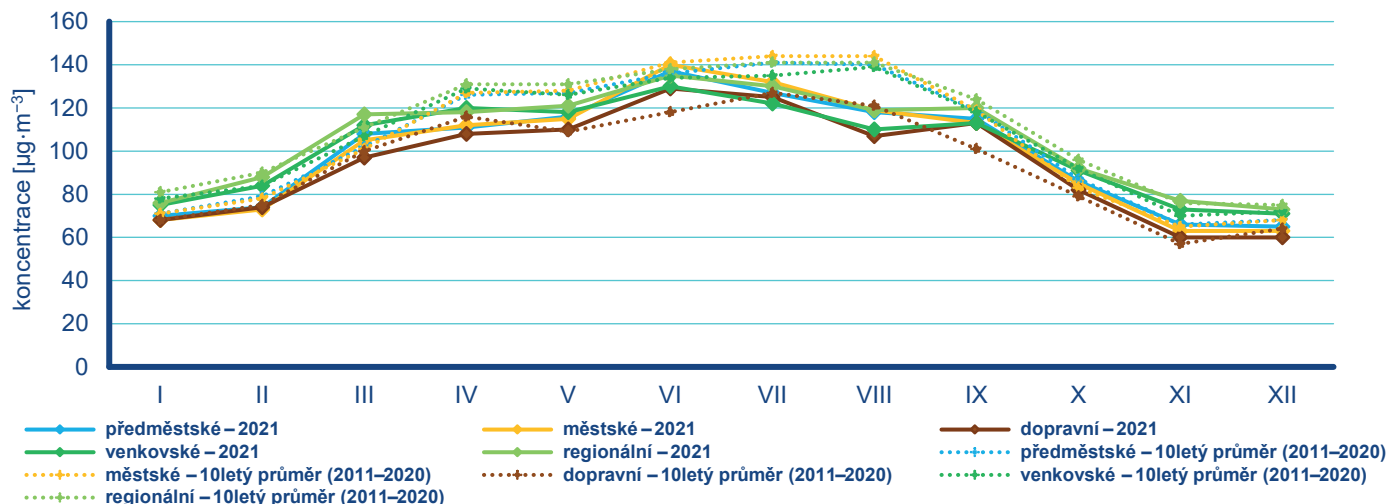
**Obr. IV.4.2 Počty překročení hodnoty imisního limitu pro maximální denní 8hod. klouzavý průměr koncentrace přízemního O<sub>3</sub> v průměru za 3 roky, 2019–2021**



**Obr. IV.4.3 Pole 26. nejvyššího maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrace přízemního O<sub>3</sub> v průměru za 3 roky, 2019–2021**



**Obr. IV.4.4 Počet překročení hodnoty imisního limitu pro maximální denní 8hod. klouzavý průměr koncentrace přízemního O<sub>3</sub> za rok na vybraných stanicích, 2019–2021**



**Obr. IV.4.5 Roční chod průměrných měsíčních koncentrací max. 8hod. klouzavého průměru O<sub>3</sub> (průměry pro daný typ stanice), 2021**

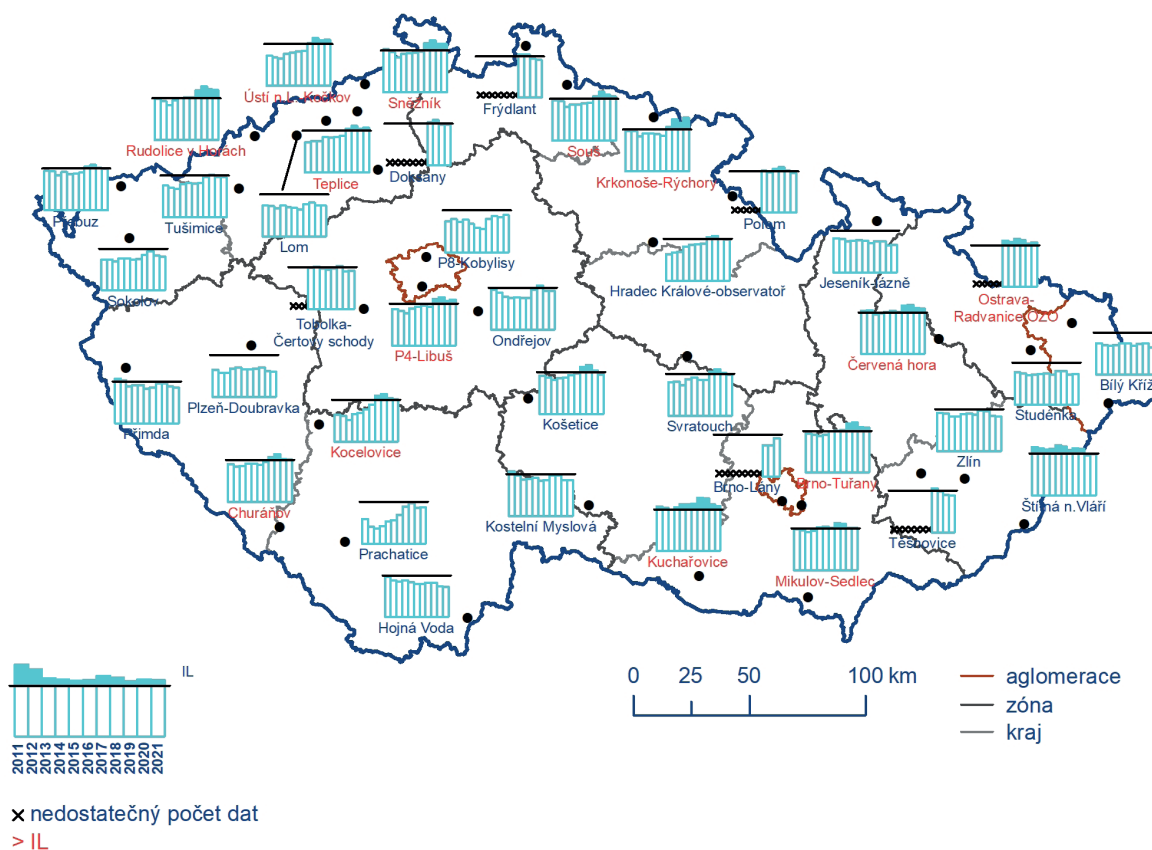
Z ročního chodu průměrných měsíčních koncentrací vyplývá, že významný propad koncentrací O<sub>3</sub> v roce 2021 byl způsoben poklesem koncentrací v teplejších měsících roku. V těchto měsících obvykle dochází k výskytu vysokých až nejvyšších koncentrací v rámci kalendářního roku, někdy vedoucích až k vyhlášení smogové situace. Propad koncentrací o cca 7–17 % v dubnu, květnu, červenci a srpnu v roce 2021 v porovnání s desetiletým průměrem

za období 2011–2020 koresponduje s převážně normálními až silně podnormálními teplotami a normálními až nadnormálními srážkami v těchto měsících (tzn. potlačení meteorologických podmínek příznivých pro vznik přízemního ozonu).

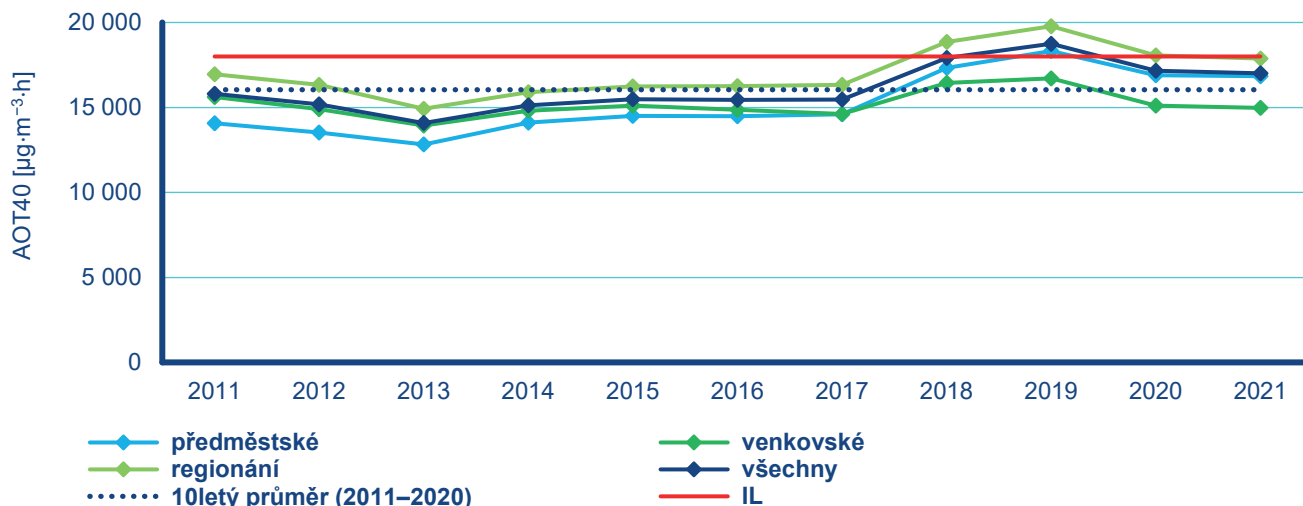
Nejnižší hodnoty koncentrací přízemního O<sub>3</sub> jsou měřeny na dopravně zatížených lokalitách (Obr. IV.4.5, IV.4.9), kde je přízemní

O<sub>3</sub> odbouráván chemickou reakcí s NO (NO je součástí NO<sub>x</sub>). Lze předpokládat, že koncentrace O<sub>3</sub> jsou nižší až podlimitní i v dalších dopravně zatíženějších oblastech, ve kterých však z důvodu absence měření nelze pomocí stávající metodiky tvorby map toto pravděpodobné snížení dokladovat. Hodnoty koncentrací přízemního O<sub>3</sub> na venkovských, předměstských a městských stanicích dosahují podobných úrovní a jsou v porovnání s koncentracemi na dopravních stanicích vyšší (Obr. IV.4.5). Toto potvrzuje i studie Paoletti et al. (2014), kdy v letech 1990–2010 bylo na stanicích

v Evropě a USA pozorováno snížení rozdílů mezi koncentracemi měřeními na lokalitách venkovských a městských. Zároveň na těchto stanicích došlo ke snížení maximálních měřených hodnot. Zmiňovaný pokles koncentrací přízemního O<sub>3</sub> je mimo jiné připisován redukcí emisí jeho prekurzorů, zejména NO<sub>x</sub> ve vyspělých státech. Snížení koncentrací v relativně čistých oblastech je přisuzováno snížení emisí jak NO<sub>x</sub>, tak i VOC v širším (evropském až globálním) měřítku (Sicard et al. 2013).



Obr. IV.4.6 Hodnoty expozičního indexu AOT40 na vybraných stanicích, průměr za 5 let, 2011–2021



Obr. IV.4.7 Hodnoty expozičního indexu AOT 40, průměr za 5 let, 2011–2021



## Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2021 vzhledem k imisním limitům pro ochranu ekosystémů a vegetace

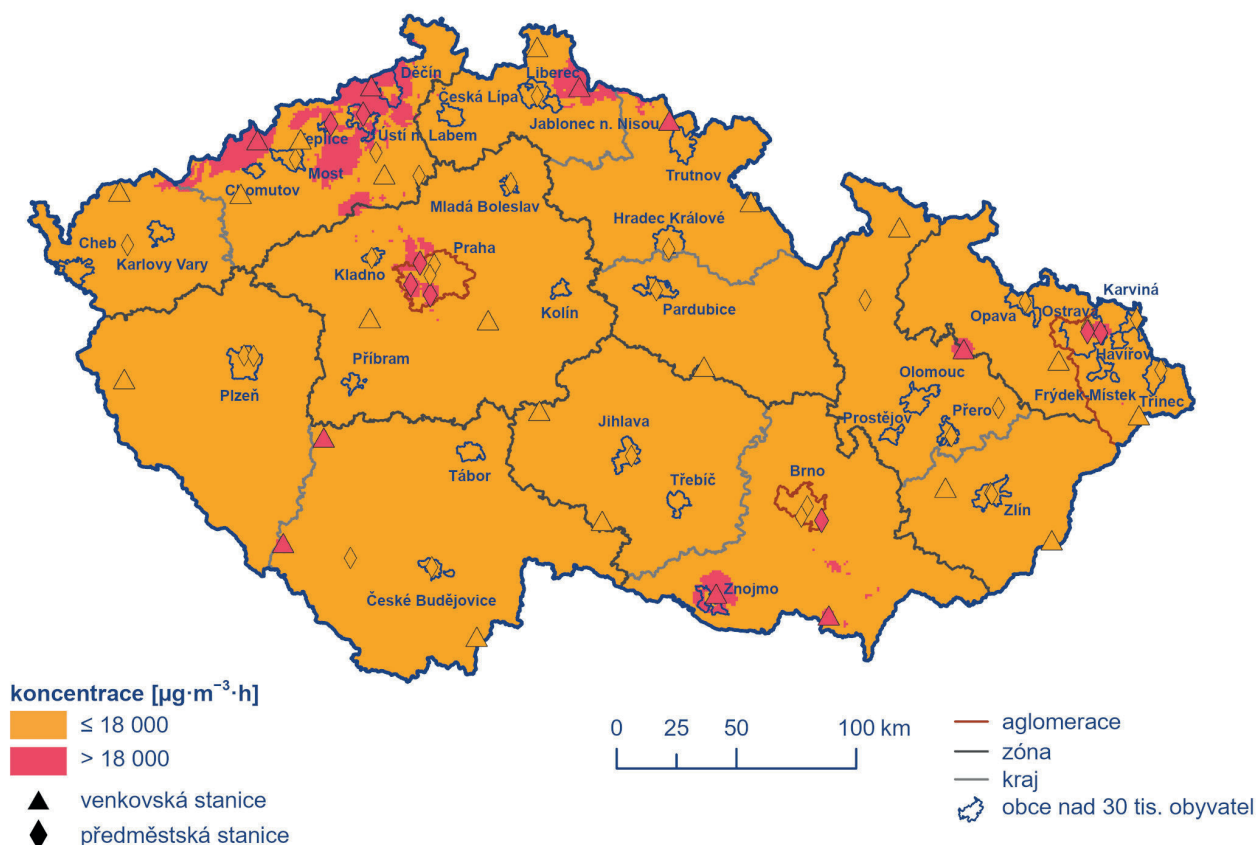
Imisní limit přízemního  $O_3$  pro ochranu vegetace  $18\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$  (průměr za pět let, Tab. I.2) byl překročen na 14 stanicích (35,9 %) z celkového počtu 39 venkovských a předměstských stanic, pro které byl podle legislativy relevantní výpočet expozičního indexu AOT40 (jedná se o průměr za roky 2017–2021). Nejvyšší hodnoty indexu AOT40 byly za hodnocené období 2011–2021 zjištěny v letech 2018 a 2019 (v průměru pro 32 venkovských a předměstských stanic s úplnou časovou řadou 2011–2021). V roce 2021 byly hodnoty indexu AOT40 čtvrté nejvyšší za období 2011–2021 (Obr. IV.4.6, Obr. IV.4.7). Nejvyšší hodnoty indexu AOT40 byly v roce 2021 zjištěny na stanicích Krkonoše-Rýchory, Rudolice v Horách, Sněžník, Ústí n. L.-Kočkov a Praha 4-Libuš. K výskytu nadlimitních hodnot AOT40 došlo v roce 2021 zejména v horských oblastech Ústeckého a Libereckého kraje, dále v části jižní Moravy a na hranicích Prahy a Středočeského kraje (Obr. IV.4.8).

Roční hodnoty indexu AOT40 dlouhodobě překračují hodnotu dlouhodobého imisního limitu ( $6\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ ) na všech venkovských a předměstských stanicích (stejný soubor stanic pro posledních pět let, Obr. IV.4.9). V rámci hodnoceného pětiletí byly roční hodnoty indexu AOT40 v roce 2021 na většině stanicích druhé nebo první nejnižší.

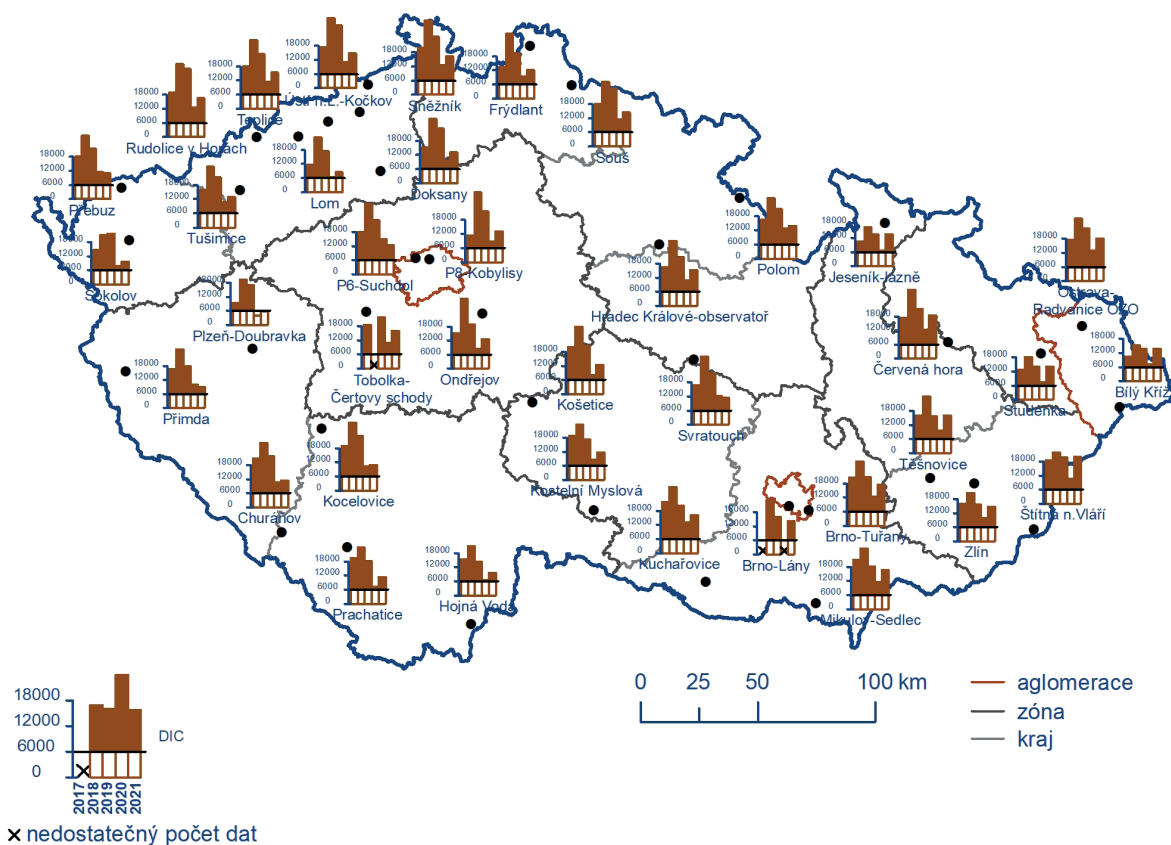
## IV.4.2 Vývoj koncentrací přízemního ozonu

Vývoj koncentrací přízemního  $O_3$ , na rozdíl od přecházejícího hodnocení založených převážně na tříletých obdobích, hodnotíme na základě maximální 8hod. průměrné koncentrace a 26. maximální 8hod. průměrné koncentrace v daném roce. První z těchto imisních charakteristik je možné porovnat s dlouhodobým imisním cílem pro přízemní  $O_3$  resp. s hodnotou imisního limitu ( $120\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Maximální roční 8hod. průměrná koncentrace (v průměru ze všech stanic, pro které je k dispozici měření za celé hodnocené období) se v letech 2011–2021 pohybovala v rozmezí od cca  $135$  do  $173\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 26. nejvyšší maximální 8hod. průměrná koncentrace pak od cca  $109$  do  $129\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Maximální denní 8hod. a 26. nejvyšší maximální 8hod. průměrné koncentrace  $O_3$  nevykazují od roku 2011 výrazný vývoj (Obr. IV.4.10 a IV.4.11); nejvyšší koncentrace byly naměřeny v letech 2013, 2015 a 2018. Všechny tyto roky jsou charakterizovány výskytem meteorologických podmínek vhodných pro vznik  $O_3$  – v roce 2013 došlo k výskytu vysokých koncentrací  $O_3$  zejména na přelomu července a srpna během řady tropických dnů. Roky 2015 a 2018 byly teplotně mimořádně nadprůměrné a srážkově silně podprůměrné (ČHMÚ 2016, 2019). Koncentrace v roce 2021 ( $135\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro maximální denní 8hod. a  $109\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro 26. ma-



Obr. IV.4.8 Pole hodnot expozičního indexu AOT40, průměr za 5 let, 2017–2021



**Obr. IV.4.9** Roční hodnoty expozičního indexu AOT40 na vybraných stanicích v porovnání s dlouhodobým imisním cílem (DIC), 2017–2021

ximální denní 8hod. průměrnou koncentraci) byly v rámci jednátiletého období 2011–2021 nejnižší (pro maximální denní 8hod. společně s rokem 2020). V porovnání s desetiletým průměrem  $151 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $117 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  koncentrace klesly o 11 % a o 7 %. Pokles ročních charakteristik koncentrací přízemního ozonu je výsledkem již zmíněných propadů koncentrací během teplejší části roku (duben–září s výjimkou června).

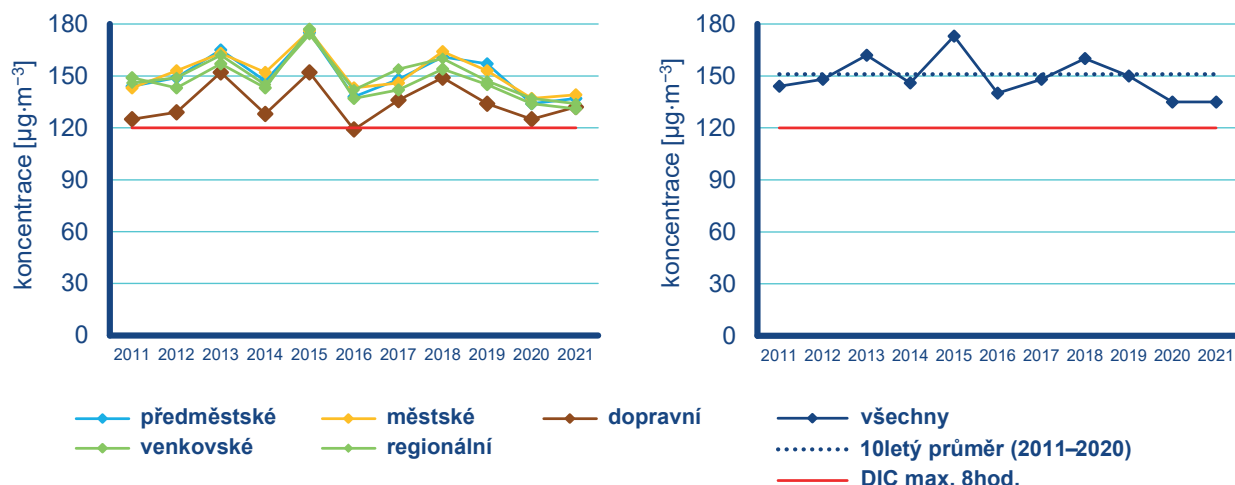
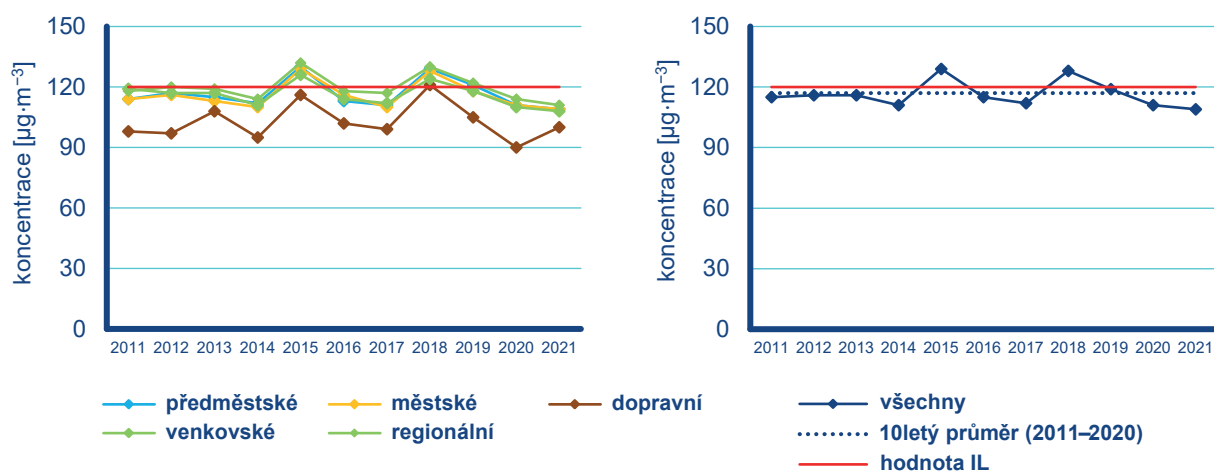
Ve srovnávání koncentrací hrají zásadní roli emise prekurzorů a meteorologické podmínky, tj. intenzita a délka slunečního svitu, teplota, rychlost větru a výskyt srážek, resp. relativní vlhkost vzduchu (Blanchard et al. 2010; Ooka et al. 2011). Vztah mezi množstvím emitovaných prekurzorů a koncentracemi přízemního  $\text{O}_3$  však není lineární. Tato nelinearita je způsobena komplikovanou atmosférickou chemií vzniku a zániku  $\text{O}_3$ , dálkovým přenosem  $\text{O}_3$  a jeho prekurzorů a dalšími faktory, mezi které se řadí meteorologické podmínky, změna klimatu, emise nemetanických těkavých organických látek (NMVOC) z vegetace a požáry lesních porostů (EEA 2013b). Vzhledem k výše uvedeným faktorům nelze meziroční změny blíže komentovat.

Na základě výsledků dlouhodobého monitoringu v ČR, kdy je k dispozici na řadě stanic již 25letá řada imisních koncentrací přízemního  $\text{O}_3$ , je možné – navzdory vysoké meziroční variabilitě  $\text{O}_3$  – smysluplně hodnotit jeho dlouhodobé trendy (Weatherhead et al. 1998). Detailní analýza časoprostorových trendů dlouhodobé-

ho měření 26 stanic různého typu (městské, venkovské, horské) za období 1994–2015 ukázala, že navzdory podstatnému snížení emisí prekurzorů i snížení imisních koncentrací přízemního  $\text{O}_3$  na většině stanic představuje přízemní  $\text{O}_3$  v ČR stále značný problém. Jasně se prokázalo, že pro žádoucí snížení imisních úrovní přízemního  $\text{O}_3$  je kritický poměr  $\text{NO}/\text{NO}_2$ , a samotný současný významný pokles celkových emisí  $\text{NO}_x$  není tedy pro snížení  $\text{O}_3$  postačující (Hůnová, Bäumelt 2018).

### IV.4.3 Vznik přízemního ozonu

Přízemní  $\text{O}_3$  nemá v atmosféře vlastní významný zdroj. Jedná se o tzv. sekundární látku vznikající v celé řadě velmi komplikovaných nelineárních fotochemických reakcí (např. Seinfeld, Pandis 2006). Prekurzory přízemního  $\text{O}_3$  jsou oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ) a nemetanické těkavé organické látky (NMVOC), v globálním měřítku hrají roli i metan ( $\text{CH}_4$ ) a oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ). Důležitou reakcí je fotolýza oxidu dusičitého ( $\text{NO}_2$ ) slunečním zářením o vlnové délce 280–430nm, při které vzniká oxid dusnatý ( $\text{NO}$ ) a atomární kyslík ( $\text{O}$ ). Reakcí atomárního a molekulárního kyslíku ( $\text{O}_2$ ) pak za přítomnosti katalyzátoru dochází ke vzniku molekuly přízemního  $\text{O}_3$ . Současně probíhá titrace  $\text{O}_3$  oxidem dusnatým za vzniku  $\text{NO}_2$  a  $\text{O}_2$ . Pokud je při této reakci přízemní  $\text{O}_3$  nahrazen radikály, jeho koncentrace v atmosféře rostou. Důležitou úlohu při těchto reakcích hraje zejména radikál OH (podrobněji např. Hůnová, Bäumelt 2018).

Obr. IV.4.10 Koncentrace  $O_3$  (max. denní 8hod. klouzavý průměr) na jednotlivých typech stanic, 2011–2021Obr. IV.4.11 Koncentrace  $O_3$  (26. nejvyšší max. denní 8hod. klouzavý průměr), 2011–2021

$NO_x$  vznikají při veškerých spalovacích procesech. NMVOC jsou emitovány z celé řady zdrojů antropogenních (doprava, manipulace s ropou a jejími deriváty, rafinerie, použití barev a rozpouštědel atd.), ale i přirozených (např. biogenní emise z vegetace).

Při vzniku přízemního  $O_3$  nezáleží pouze na absolutním množství prekurzorů, ale i na jejich vzájemném poměru (Sillman et al. 1990; Fiala, Závodský 2003). Ve venkovských oblastech, kde je režim limitovaný  $NO_x$ , charakterizovaný relativně nízkými koncentracemi  $NO_x$  a vysokými koncentracemi VOC, narůstají koncentrace  $O_3$  s rostoucími koncentracemi  $NO_x$ , zatímco se vzrůstajícími koncentracemi VOC se mění jen málo. Naopak v oblastech s režimem limitovaným VOC dochází k poklesu koncentrací  $O_3$  s rostoucími koncentracemi  $NO_x$  a k nárůstu koncentrací  $O_3$  s rostoucími koncentracemi VOC. Zvýšení koncentrací  $O_3$  v důsledku poklesu emisí  $NO_x$ , respektive rostoucího poměru  $NO_2/NO$  (modernizace a denitrifikace velkých emisních zdrojů) bylo pozorováno v severozápadních echách (Hůnová, Bäumelt 2018).

Oblasti s vysokým poměrem  $NO_x/VOC$  jsou typicky znečištěné oblasti okolo center velkých měst. Závislost vzniku přízemního  $O_3$  na počátečních koncentracích VOC a  $NO_x$  se často vyjadřují na diagramech ozonových isopleť. Jedná se o zobrazení maximální dosažené koncentrace přízemního  $O_3$  jako funkce počáteční koncentrace  $NO_x$  a VOC (Moldanová 2009). Významnou roli při vzniku přízemního  $O_3$  hrají nejen koncentrace prekurzorů, ale i meteorologické podmínky (Colbeck, Mackenzie 1994). Imisní koncentrace přízemního  $O_3$  rostou s rostoucím ultrafialovým zářením a teplotou vzduchu, naopak klesají s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu. Tyto závislosti byly prokázány i na výsledcích dlouhodobých měření ČHMÚ (Hůnová et al. 2019b). Vysoké koncentrace bývají spojeny s déletrvající anti-cyklonální situací. Kromě výše popsaného fotochemického mechanismu se koncentrace přízemního  $O_3$  mohou zvyšovat i epizodicky v důsledku průniku stratosférického  $O_3$  do troposféry a také při bouřkách. V poslední době se rovněž zvyšuje význam dálkového přenosu přízemního  $O_3$  v rámci proudění na severní polokouli do Evropy a Severní Ameriky ze zdrojových oblastí jihovýchodní Asie. Přízemní  $O_3$  je z atmosféry odstraňován reakcí s  $NO$ , mechanismem suché či mokré depozice a interakcí s rostlinami (stomatárním tokem).