

## IV.4 Přízemní ozon

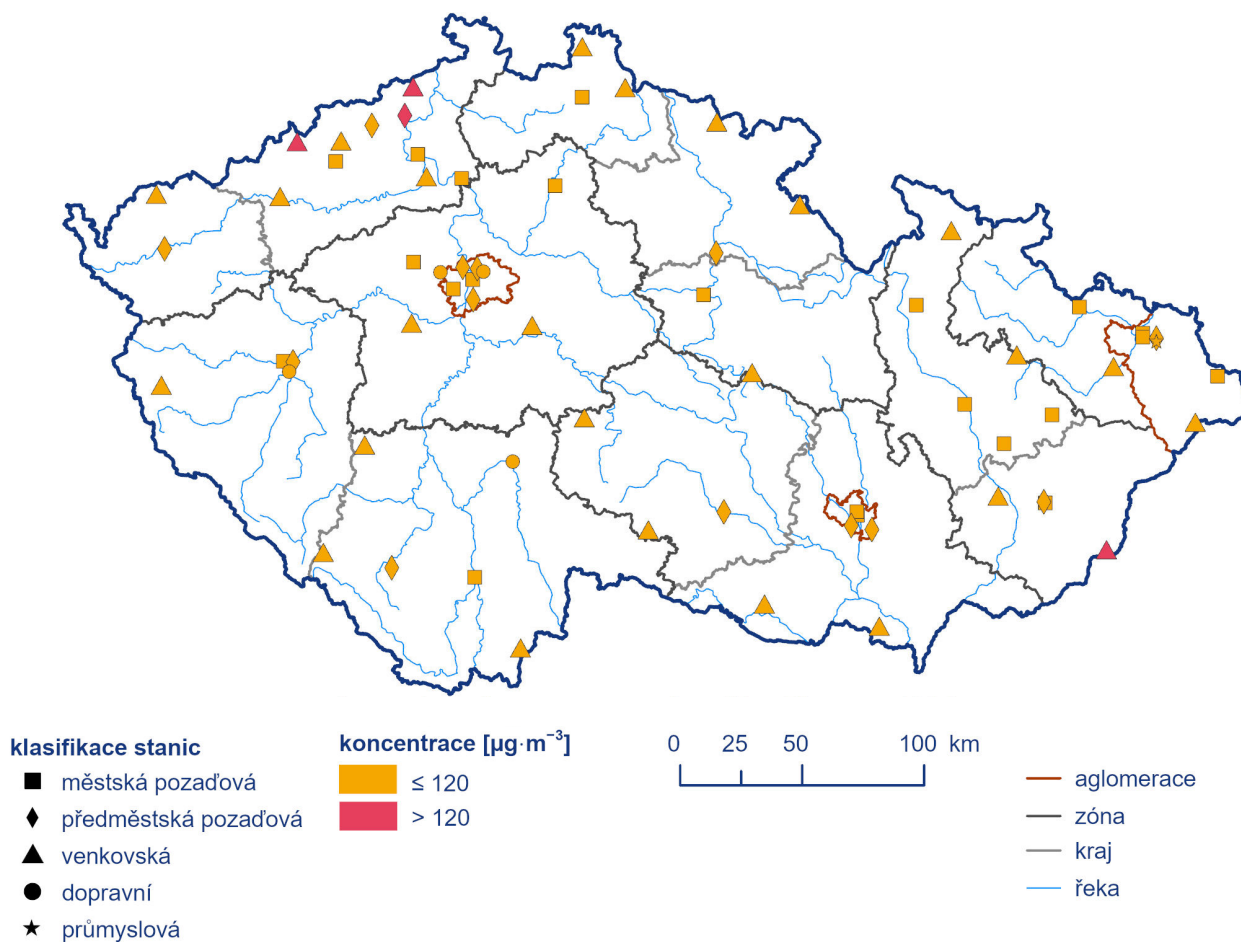
### IV.4.1 Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2023

#### Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2023 vzhledem k imisním limitům pro ochranu lidského zdraví

Imisní limit přízemního ozonu ( $O_3$ ) byl za tříleté období 2021–2023<sup>1</sup> překročen pouze na 4 ze 68 stanic (6 %), na kterých byly koncentrace přízemního  $O_3$  měřeny (Obr. IV.4.1 a IV.4.2). Jednalo se o tři regionální stanice (Sněžník, Štítná n. Vláří a Rudolice v Horách) a o jednu předměstskou pozadovou stanici Ústí n.L.-Kočkov. Tyto stanice jsou situované ve vyšších nadmořských výškách a/nebo

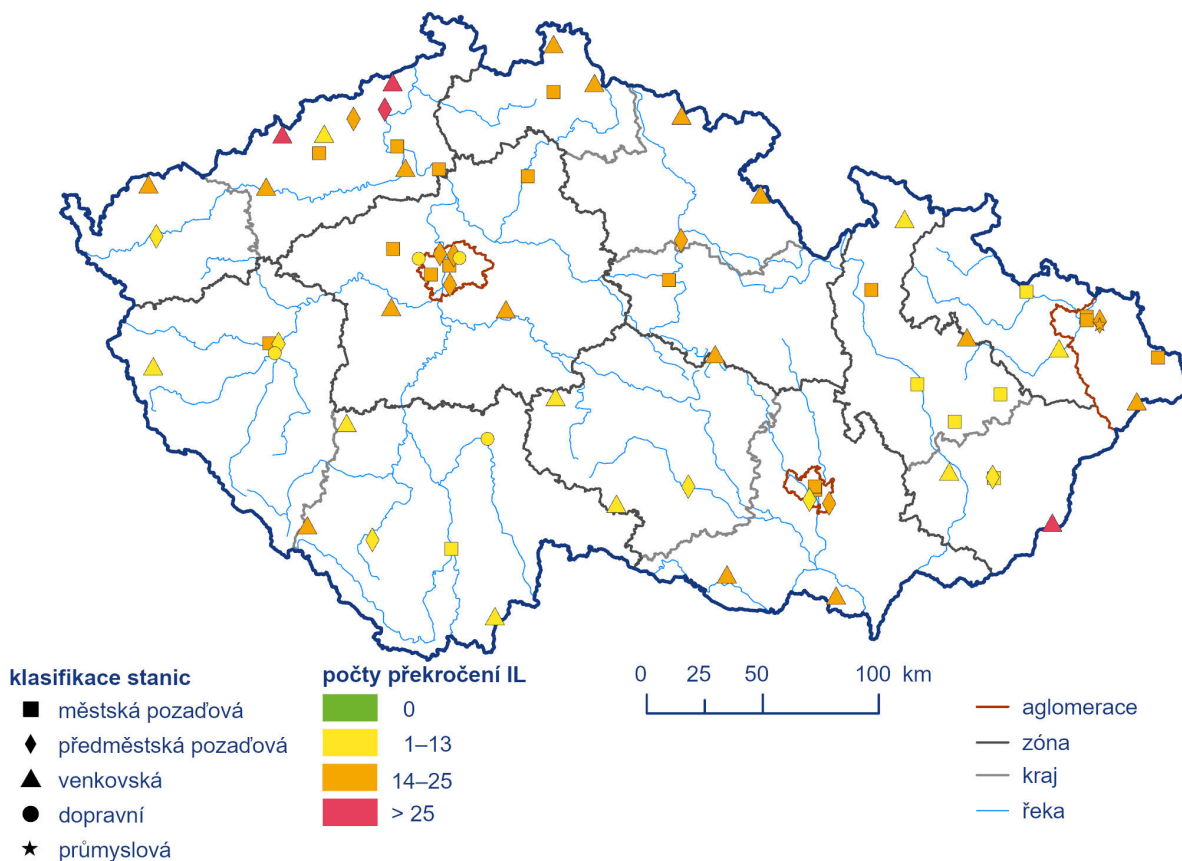
v Ústeckém kraji, kde jsou zvýšené koncentrace ozonu typické. Za předchozí tříleté období 2020–2022 byl imisní limit přízemního  $O_3$  překročen pouze na 3 ze 68 stanic (4 %), za období 2019–2021 na 4 z 66 (6 %), za období 2018–2020 na 34 z 67 stanic (51 %) a za období 2017–2019 na 36 z 64 stanic (56 %).

K překročení imisního limitu přízemního  $O_3$  došlo ve tříletém období 2021–2023 na pouhých 0,1 % území ČR s 0,1 % obyvatel (Obr. IV.4.3), tedy na podobně velkém území jako v předchozích dvou tříletých období (tj. 0,2 % území ČR v období 2020–2022 a 2019–2021). Naopak v předcházejících období 2018–2020, resp. 2017–2019 bylo překročeno na 62 %, resp. 71 % území, což bylo dáno výskytem relativně vysokých koncentrací přízemního  $O_3$  v letech 2017–2019. V rámci hodnoceného tříletého období 2021–2023 se na počtu překročení imisního limitu nejvíce podílel rok 2022 (Obr. IV.4.4), a to 45 % ze součtu všech překročení na všech stanicích. Nejmenší podíl měl rok 2021 s 21 %, zatímco v roce 2023 byl podíl 34 %.

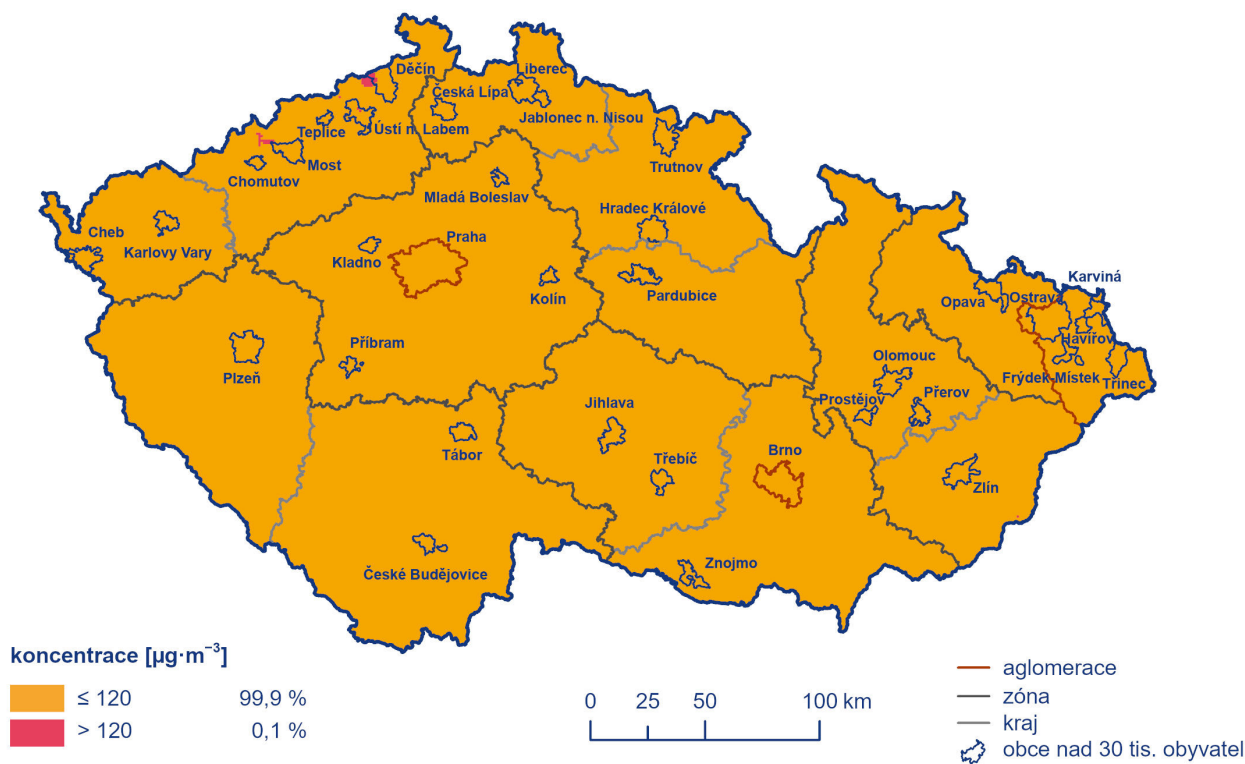


Obr. IV.4.1 26. nejvyšší hodnoty maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrací přízemního  $O_3$  v průměru za 3 roky měřené na stanicích imisního monitoringu, 2021–2023

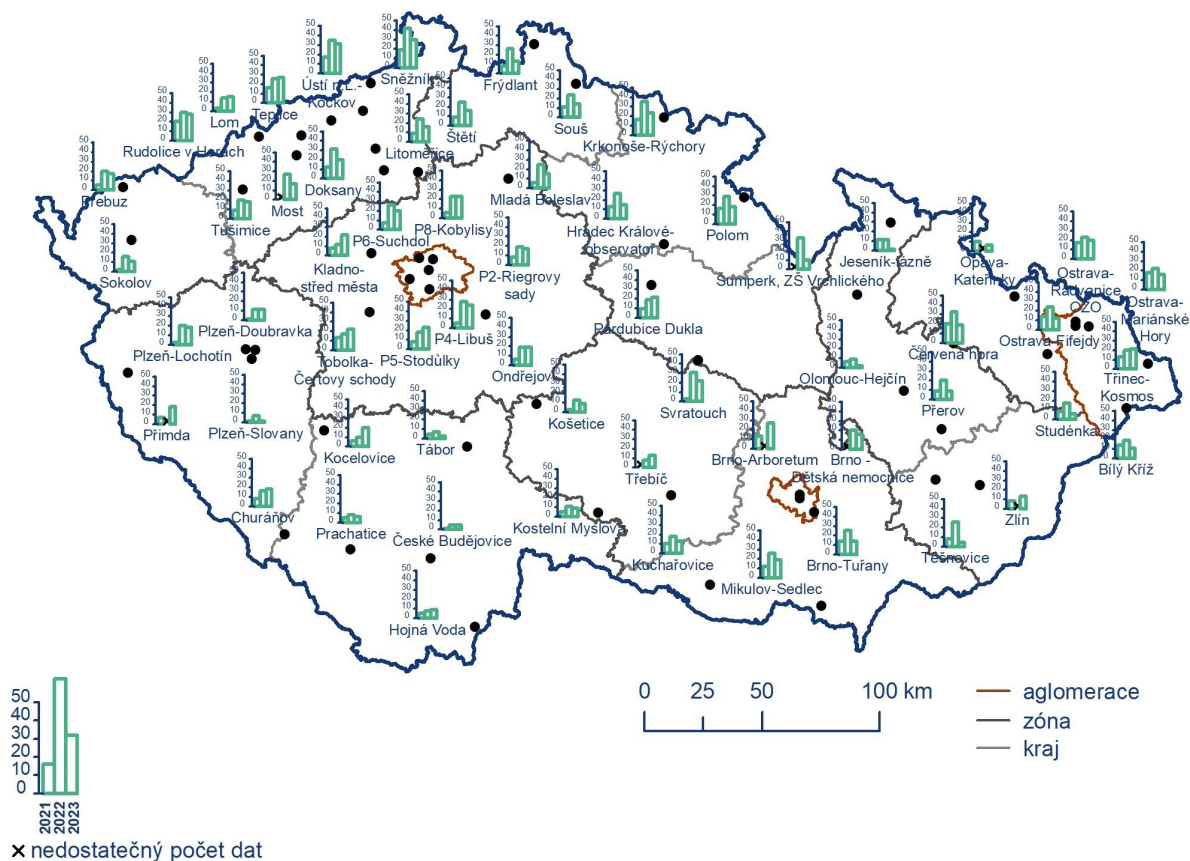
1 Imisní limit je překročen, jestliže byl maximální denní 8hodinový klouzavý průměr  $O_3$  vyšší než  $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  alespoň 26× v průměru za 3 roky.



**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, 2021–2023**



**Obr. IV.4.3 Pole 26. nejvyššího maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrace přízemního O<sub>3</sub> v průměru za 3 roky, 2021–2023**



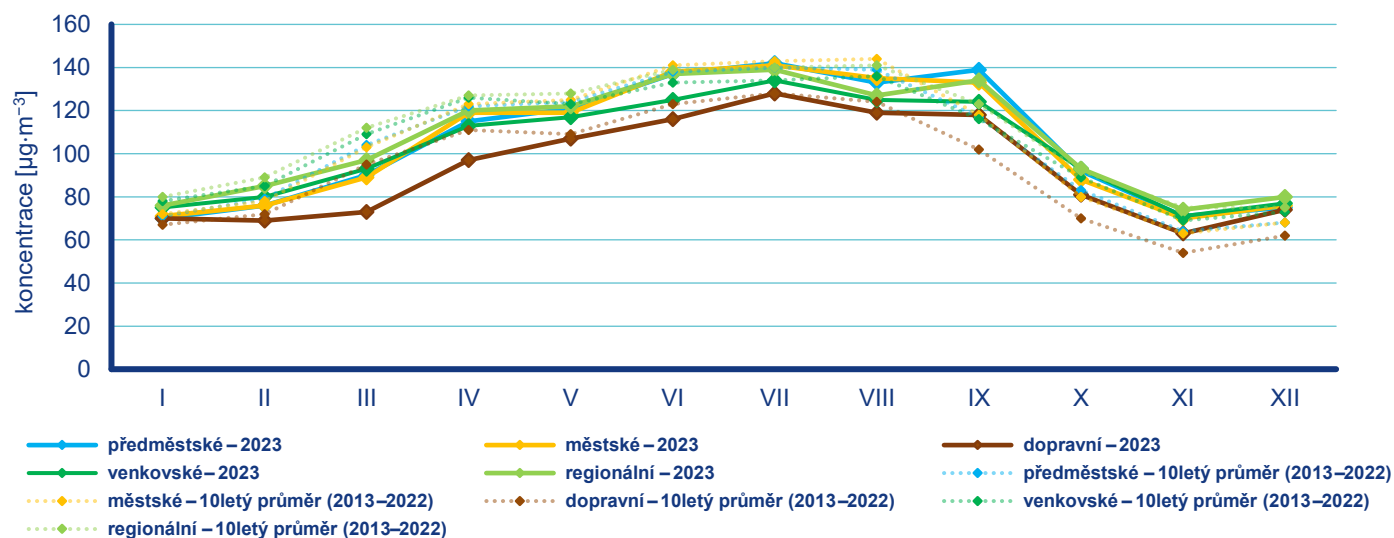
**Obr. IV.4.4 Počet překročení hodnoty imisního limitu pro maximální denní 8hod. klouzavý průměr koncentrace přízemního  $O_3$  za rok na vybraných stanicích, 2021–2023**

Roční chod průměrných měsíčních koncentrací přízemního  $O_3$  (maximální 8hodinový průměr za daný měsíc, průměr pro jednotlivé typy stanic) je obecně charakterizován nárůstem koncentrací v letním období (duben–září) z důvodu výskytu příznivých meteorologických podmínek pro vznik  $O_3$  (Obr. IV.4.5).

Průměrné měsíční koncentrace přízemního  $O_3$  se v letním období roku 2023 pohybovaly mírně pod hodnotou měsíčního desetiletého průměru (2013–2022), tzn. že byly o cca 1–5 % nižší, s výjimkou měsíce září, kdy byly zaznamenány nadprůměrné koncentrace. Nejvyšší koncentrace přízemního  $O_3$  byly v roce 2023 naměřeny v červenci, tj. v nejteplejším měsíci roku 2023, který byl charakterizován jako teplotně nadnormální a srážkově jako normální. Nárůst koncentrací od dubna do srpna odpovídá meteorologickým podmínkám v těchto měsících – normálním až nadnormálním teplotám (s výjimkou silně podnormálního dubna) a normálním až silně podnormálním srážkám (s výjimkou silně nadnormálního dubna a srpna). Zvýšení koncentrací přízemního ozonu v září 2023 o 14 % ve srovnání s desetiletým průměrem za období 2013–2022 bylo v souladu s meteorologickými podmínkami charakterizujícími toto září – mimořádně teplým a velmi suchým měsícem (Obr. III.2 a Obr. III.4). V září byla vyhlášena z důvodu vysokých koncentrací přízemního  $O_3$  jedna smogová situace, a to

v Ústeckém kraji, trvající celkem 16 h (více viz kap. VI.).

Nejnižší hodnoty koncentrací přízemního  $O_3$  jsou měřeny na dopravně zatížených lokalitách (Obr. IV.4.5, IV.4.10–11), kde je přízemní  $O_3$  odbouráván chemickou reakcí s oxidem dusnatým (NO), který je součástí oxidů dusíku ( $NO_x$ ). Lze předpokládat, že koncentrace přízemního  $O_3$  jsou nižší až podlimitní i v dalších dopravně zatíženějších oblastech. Z důvodu absence měření nelze pomocí stávající metodiky tvorby map toto pravděpodobné snížení dokladovat. Hodnoty koncentrací přízemního  $O_3$  na venkovských, předměstských a městských stanicích dosahují podobných úrovní a jsou v porovnání s koncentracemi na dopravních stanicích vyšší. 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  $O_3$  je mimo jiné připisován redukcí emisí jeho prekurzorů, zejména  $NO_x$  ve vyspělých státech. Snížení koncentrací v relativně čistých oblastech je přisuzováno snížení emisí jak  $NO_x$ , tak i volatilních organických látek (VOC) v širším (evropském až globálním) měřítku (Sicard et al. 2013).



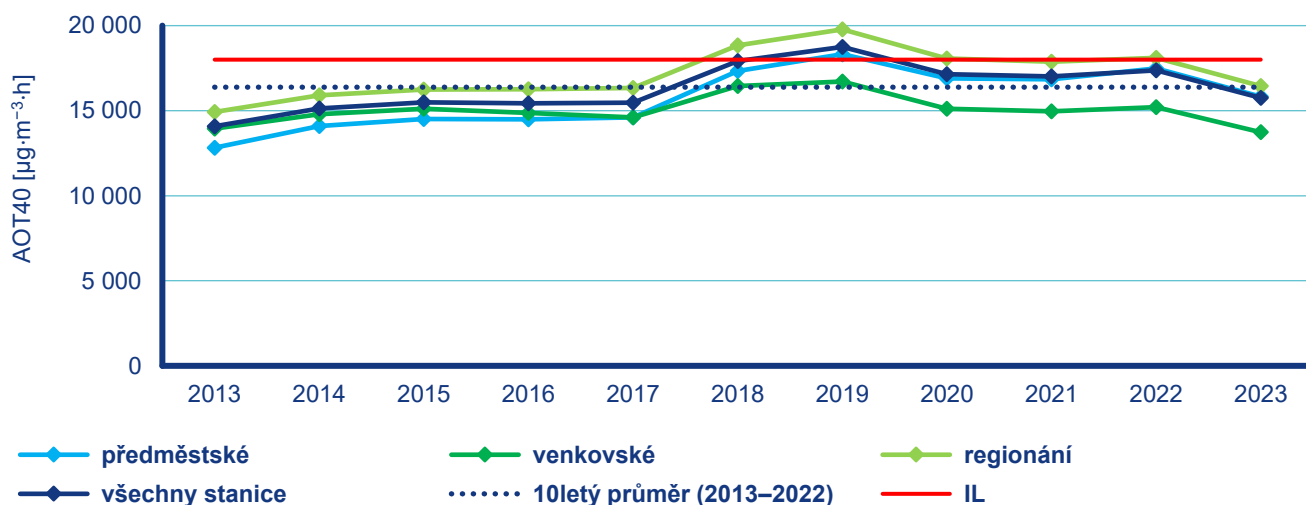
Obr. IV.4.5 Roční chod průměrných měsíčních koncentrací max. 8hod. klouzavého průměru  $O_3$  (průměry pro daný typ stanice), 2023

### Znečištění ovzduší přízemním ozonem v roce 2023 vzhledem k imisním limitům pro ochranu ekosystémů a vegetace

Dle platné české legislativy se hodnotí úroveň ročních koncentrací přízemního  $O_3$  vzhledem k imisnímu limitu pro ochranu ekosystémů a vegetace pouze na předměstských a venkovských lokalitách. 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 7 z 39 venkovských a předměstských stanic (18 %), pro které byl podle legislativy relevantní výpočet expozičního indexu  $AOT_{40}^2$  (průměr za roky 2019–2023). Nejvyšší hodnoty indexu

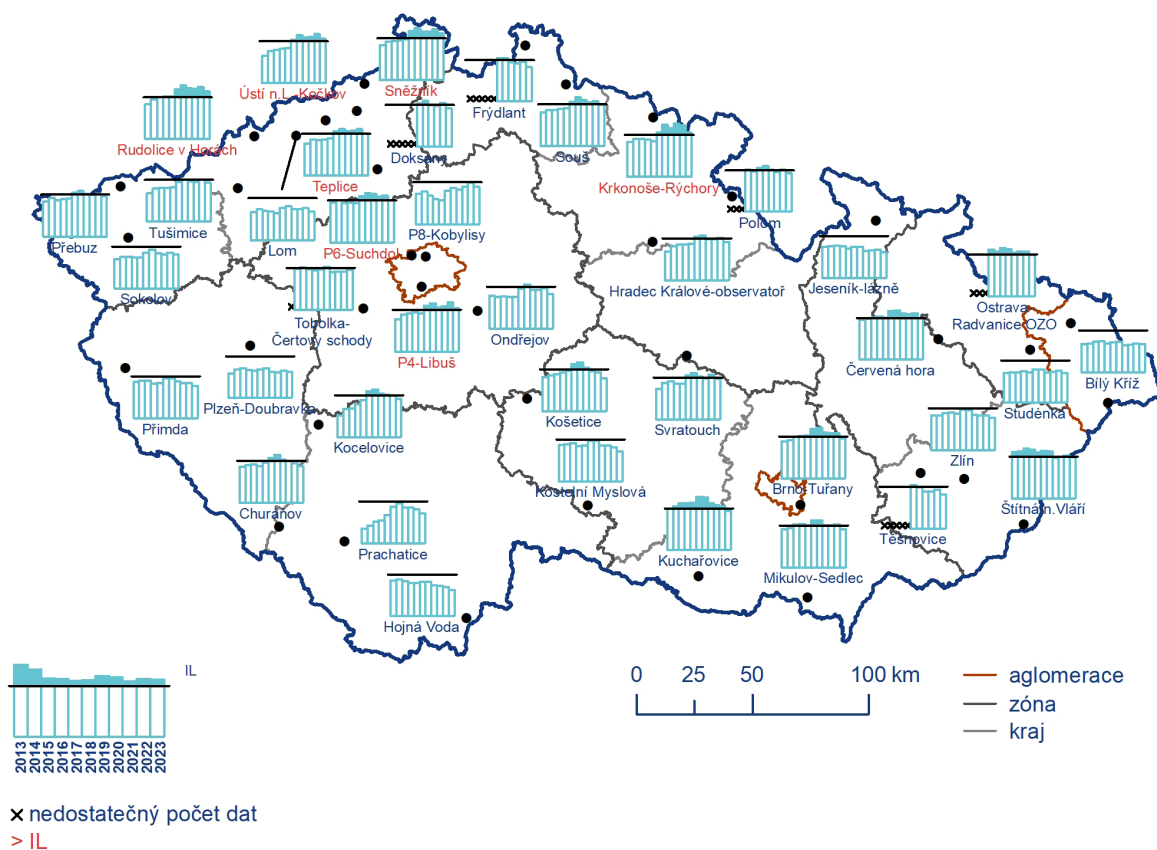
$AOT_{40}$  za hodnocené období 2013–2023 byly zjištěny v letech 2018, 2019 a 2020 (v průměru pro 32 venkovských a předměstských stanic s úplnou časovou řadou 2013–2023). V roce 2023 byly hodnoty indexu  $AOT_{40}$  šesté nejvyšší za období 2013–2023 (Obr. IV.4.6, Obr. IV.4.7). Nadlimitní hodnoty indexu  $AOT_{40}$  byly v roce 2023 zjištěny na stanicích Rudolice v Horách, Sněžník, Krkonoše-Rýchory, Ústí nad Labem-Kočkov, Praha 4-Libuš, Praha 6-Suchdol a Teplice.

Mapa hodnot expozičního indexu  $AOT_{40}$  (Obr. IV.4.8) byla připravena pomocí kombinace dat ze všech typů stanic a rozptylového modelu a přináší informace o plošném rozložení

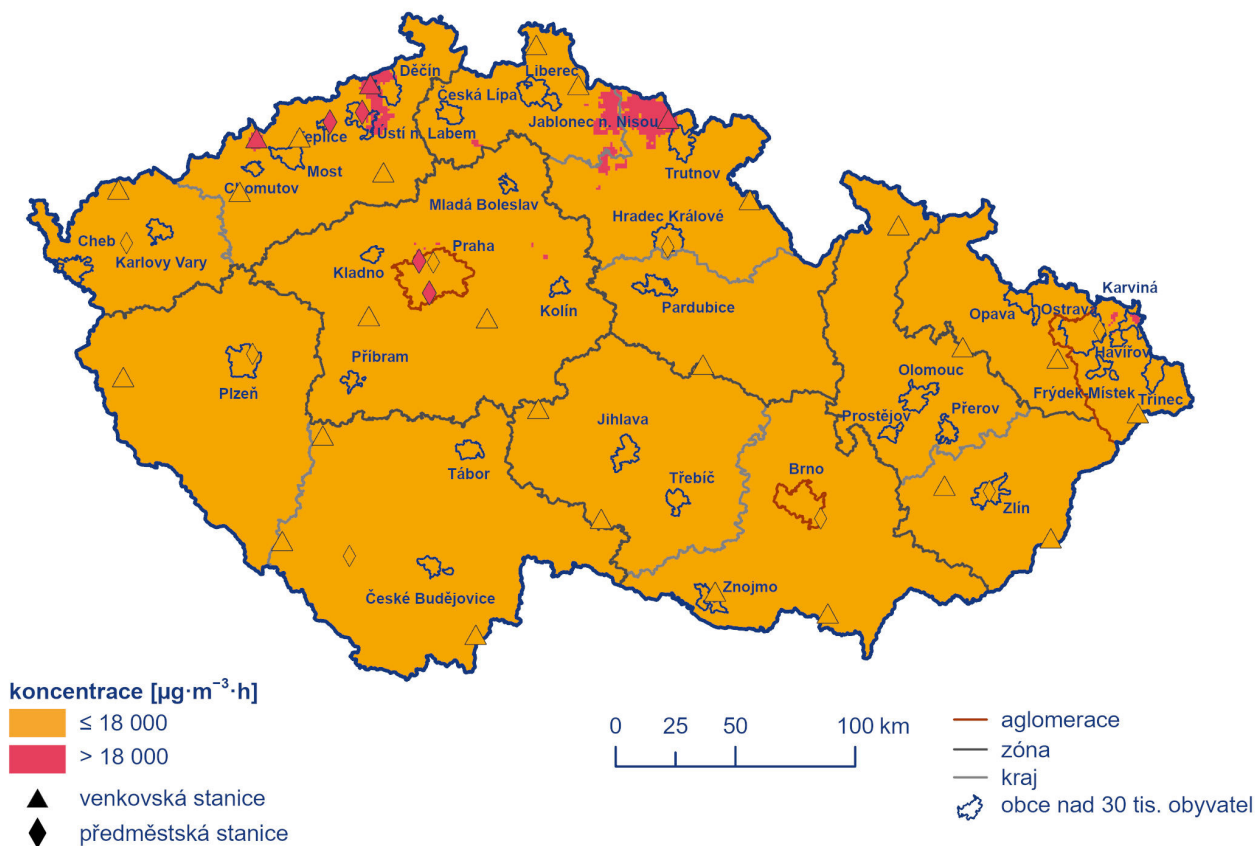


Obr. IV.4.6 Hodnoty expozičního indexu  $AOT_{40}$ , klouzavý 5letý průměr, 2013–2023

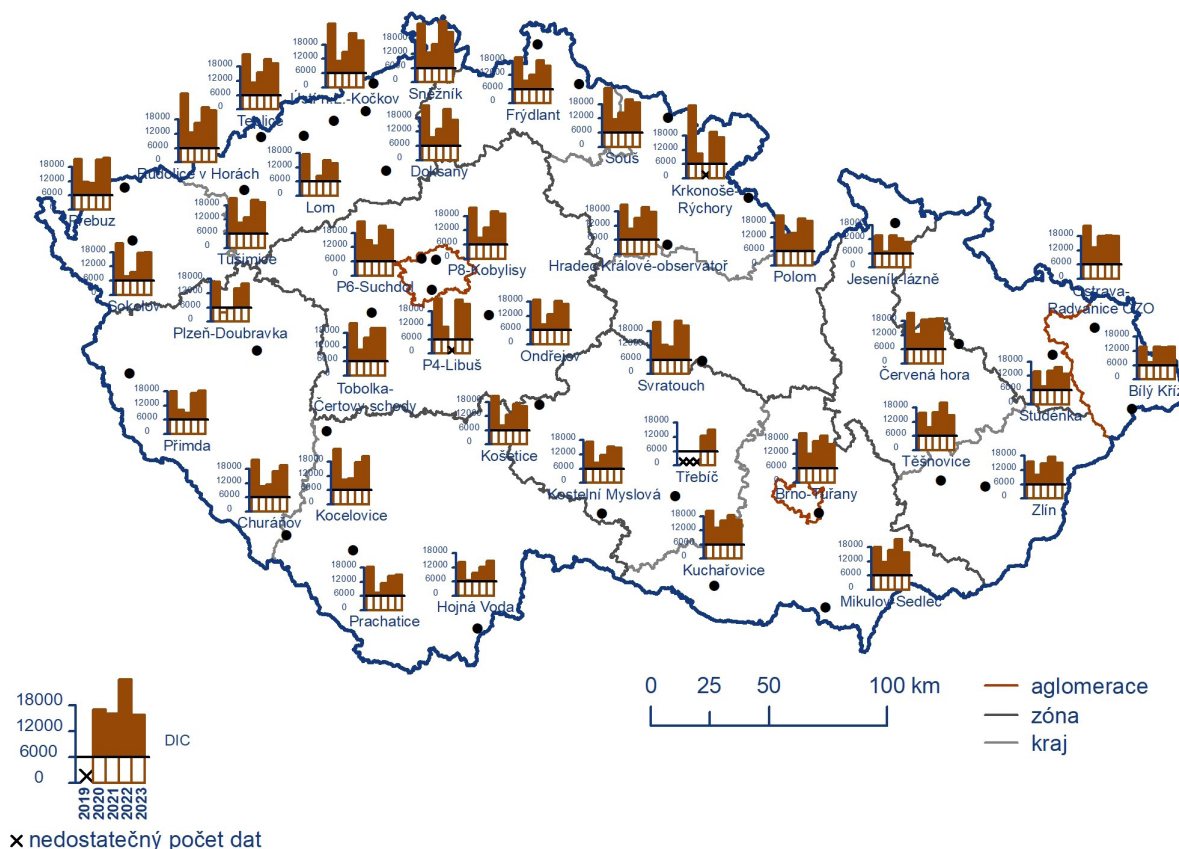
2  $AOT_{40}$  znamená součet rozdílů mezi hodinovou koncentrací větší než  $80\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $= 40\ \text{ppb}$ ) a hodnotou  $80\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  v dané periodě užitím pouze hodinových hodnot změřených každý den mezi 8:00 a 20:00 SEČ.



Obr. IV.4.7 Hodnoty expozičního indexu AOT40 na vybraných stanicích, klouzavý 5letý průměr, 2013–2023



Obr. IV.4.8 Pole hodnot expozičního indexu AOT40, průměr za 5 let, 2019–2023



**Obr. IV.4.9** Roční hodnoty expozičního indexu AOT40 na vybraných stanicích v porovnání s dlouhodobým imisním cílem (DIC), 2019–2023

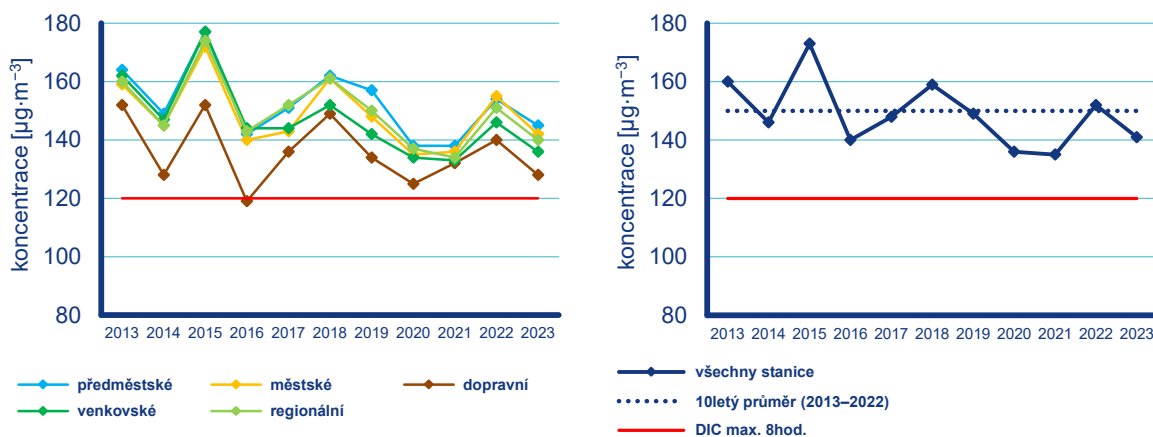
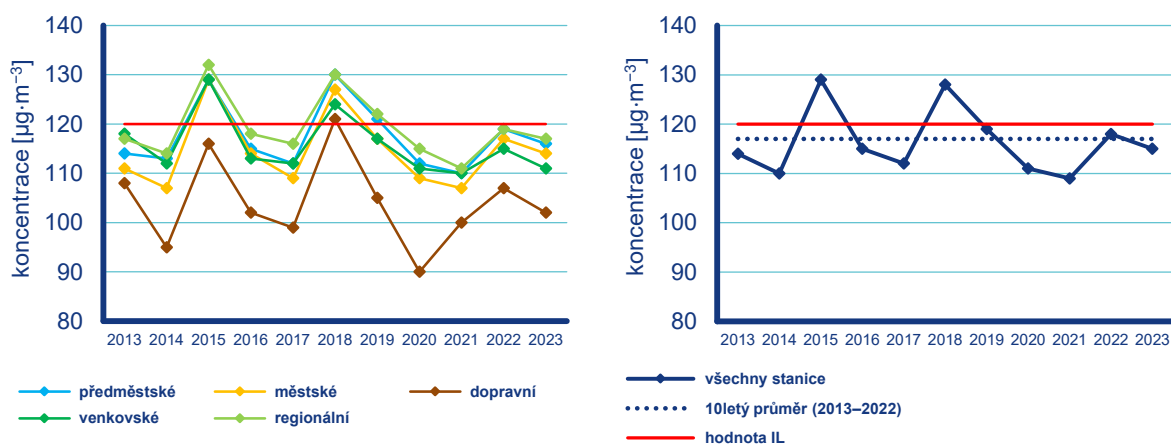
úroveň koncentrací expozičního indexu AOT40 v ČR, nikoliv o překročení imisního limitu pro ochranu ekosystémů a vegetace. V české legislativě nejsou vymezené oblasti, ve kterých se má sledovat úroveň koncentrací znečišťujících látek vzhledem k limitům pro vegetaci a ekosystémy, proto jsou v ročence hodnoceny úrovně naměřených koncentrací plošně alespoň na území národních parků a chráněných krajinných oblastí (více viz kap. VII.2). Dle plošné mapy hodnot indexu AOT40 došlo v roce 2023 k výskytu zvýšených koncentrací částečně na území Ústeckého, Libereckého kraje a Královéhradeckého a kraje Prahy a v menších územních celcích Středočeského a Moravskoslezského kraje.

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 2023 na cca 2/3 stanic třetí nejvyšší.

## IV.4.2 Vývoj koncentrací přízemního ozonu

Vývoj koncentrací přízemního  $\text{O}_3$ , na rozdíl od předchozích 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 (DIC) pro přízemní  $\text{O}_3$  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 2013–2023 pohybovala v rozmezí od 135 do  $173\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 26. maximální 8hod. průměrná koncentrace pak od cca 110 do  $129\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Maximální denní 8hod. a 26. nejvyšší maximální 8hod. průměrné koncentrace přízemního  $\text{O}_3$  nevykazují od roku 2012 výrazný vývoj (Obr. IV.4.10 a Obr. IV.4.11), neboť koncentrace ozonu jsou silně závislé na meteorologických podmínkách zejména teplého období roku (duben–září). Nejvyšší maximální denní 8hod. koncentrace byly naměřeny v letech 2013, 2015 a 2018, v případě 26. nejvyšší maximální denní 8hod. koncentrace v letech 2015, 2018, 2019 a 2022. Všechny tyto roky jsou charakterizovány

Obr. IV.4.10 Koncentrace přízemního  $O_3$  (max. denní 8hod. klouzavý průměr) na jednotlivých typech stanic, 2013–2023Obr. IV.4.11 Koncentrace přízemního  $O_3$  (26. nejvyšší max. denní 8hod. klouzavý průměr), 2013–2023

výskytem meteorologických podmínek vhodných pro vznik  $O_3$  – v roce 2013 došlo k výskytu vysokých koncentrací přízemního  $O_3$  zejména na přelomu července a srpna, v roce 2022 byly měřeny vysoké koncentrace v srpnu, ale byly zaznamenány i neobvykle zvýšené koncentrace v březnu. Roky 2015, 2018 a 2019 byly teplotně mimořádně nadnormální, rok 2022 byl teplotně nadnormální, roky 2015 a 2018 i srážkově silně podprůměrné. Koncentrace v roce 2023 ( $141 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro maximální denní 8hod. a  $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro 26. maximální denní 8hod. průměrnou koncentraci) byly v rámci jedenáctiletého období 2013–2023 čtvrté resp. šesté nejnižší. Koncentrace pro rok 2023 jsou mírně nižší než desetileté průměry pro období 2013–2022 ( $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro maximální denní 8hod. a  $117 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro 26. maximální denní 8hod. průměrnou koncentraci).

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  $O_3$  však není lineární. Tato nelinearita je způsobena komplikovanou atmosférickou chemií vzniku a zániku přízemního  $O_3$ , dálkovým přenosem přízemního  $O_3$  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 více než 30letá řada imisních koncentrací přízemního  $O_3$ , je možné – navzdory vysoké meziroční variabilitě  $O_3$  – smysluplně hodnotit jeho dlouhodobé trendy (Weatherhead et al. 1998). Detailní analýza časoprostorových trendů dlouhodobého měření 26 stanic různého typu (městské, venkovské, horské) za období 1994–2015 ukázala, že navzdory podstatnému snížení emisí prekurzorů i snížení imisních koncentrací přízemního  $O_3$  na většině stanic představuje přízemní  $O_3$  v ČR stále značný problém. Jasně se prokázalo, že pro žádoucí snížení imisních úrovní přízemního  $O_3$  je kritický poměr  $\text{NO}/\text{NO}_2$ , a samotný současný významný pokles celkových emisí  $\text{NO}_x$  není tedy pro snížení přízemního  $O_3$  postačující (Hůnová, Baumelt 2018). Současně bylo z výsledků měření ČHMÚ zjištěno, že v posledních letech (přibližně od roku 2014) střední koncentrace přízemního  $O_3$  na českých stanicích rostou, což patrně souvisí s probíhající klimatickou změnou (Hůnová et al. 2020).

### IV.4.3 Vznik přízemního ozonu

Přízemní  $O_3$  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  $O_3$  jsou  $NO_x$  a nemetanické NMVOC, v globálním měřítku hrají roli i metan ( $CH_4$ ) a oxid uhelnatý (CO). Důležitou reakcí je fotolýza oxidu dusičitého ( $NO_2$ ) slunečním zářením o vlnové délce 280–430nm, při které vzniká NO a atomární kyslík (O). Reakcí atomárního a molekulárního kyslíku ( $O_2$ ) pak za přítomnosti katalyzátoru dochází ke vzniku molekuly  $O_3$ . Současně probíhá titrace  $O_3$  oxidem dusnatým za vzniku  $NO_2$  a  $O_2$ . Pokud je při této reakci  $O_3$  nahrazen radikálem, jeho koncentrace v atmosféře roste. Důležitou úlohu při těchto reakcích hraje zejména hydroxilový radikál (OH) (podrobněji např. Hůnová, Baumelt 2018).  $NO_x$  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 (Seinfeld, Pandis 2006).

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 přízemního  $O_3$  s rostoucími koncentracemi  $NO_x$ , zatímco se vzrůstajícími koncentracemi VOC se mění jen málo. Naopak v oblastech s režimem limitovaným VOC dochází k poklesu kon-

centrací přízemního  $O_3$  s rostoucími koncentracemi  $NO_x$  a k nárůstu koncentrací přízemního  $O_3$  s rostoucími koncentracemi VOC. Zvýšení koncentrací přízemního  $O_3$  v důsledku poklesu emisí  $NO_x$ , respektive rostoucího poměru  $NO_2/NO$  (modernizace a denitrifikace velkých emisních zdrojů) bylo pozorováno v severozápadních Čechách (Hůnová, Baumelt 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 isopleth. 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  $O_3$  narůstají s rostoucí intenzitou ultrafialového záření a zvyšující se teplotou vzduchu, naopak klesají s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu. Tyto závislosti byly prokázány i na výsledcích dlouhodobých měření ČHMÚ (Hůnová et al. 2019). Vysoké koncentrace bývají spojeny s déletrvající anticyklonální situací. Kromě výše popsaného fotochemického mechanismu se koncentrace přízemního  $O_3$  mohou zvyšovat i epizodicky v důsledku průniku stratosférického ozonu 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).