

**Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí (B1601)

Studijní obor: Ochrana životního prostředí (1604R007)



Denis Binda

Vertikální gradient imisných koncentrací znečišťujících látek

Vertical gradient of ambient air pollutant levels

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Iva Hůnová, CSc.

Praha, 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Ivy Hůnové, CSc., za využití odborné literatury a jiných informačních zdrojů a pramenů, které jsou v textu řádně označeny a uvedeny v seznamu použité literatury. Dále svým prohlášením dokládám, že tištěná verze práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze dne 9. května 2022

.....

Denis Binda

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som chcel vysloviť veľkú vďaku mojej školiteľke doc. RNDr. Ivě Hůnové, CSc., za jej veľkú ochotu, pomoc, humor a to množstvo voľného času, ktoré mi venovala pri konzultáciách a riešení problémov, ktoré sa vyskytli v priebehu písania práce – aj vďaka nej máte túto prácu práve teraz vo svojich rukách. Ďakujem!

Veľká vďaka patrí aj Českému hydrometeorologickému ústavu, ktorým poskytnuté dáta nameraných koncentrácií ozónu umožnili spracovanie praktickej časti tejto práce. Taktiež by som chcel poďakovať Mgr. Burakovi Aygünovi z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy za jeho konzultáciu k matematickej stránke práce.

Na záver by som chcel tiež poďakovať svojej rodine za ich podporu počas štúdia a svojim kamarátom, vďaka ktorým bolo štúdium na univerzite oveľa zábavnejšie a zvládnuteľnejšie, najmä počas mnohých karantén, ktoré nám zobrali rok a pol spoločného času v škole a mnohé zážitky.

Abstrakt

Znečistenie ovzdušia škodlivými polutantmi je považované za vážny problém ovplyvňujúci životné prostredie a mnohé jeho zložky. Účinná regulácia znečistenia je možná za predpokladu spoľahlivých dát získaných z meracích staníc naprieč celou krajinou, ktoré sa najčastejšie nachádzajú vo výške 2 m nad povrchom a majú stanovenú vlastnú reprezentatívnosť v horizontálnom smere. Reprezentatívnosť týchto staníc vo vertikále je však neznáma, čo predstavuje problém z dôvodu nedostatku informácií o relevantnosti týchto meraní pre štúdium pôsobenia znečisťujúcich látok v rozdielnej výške nad povrchom. V záujme zistenia vertikálneho profilu ozónu boli v praktickej časti spracované namerané koncentrácie z hladín 2, 8, 50 a 230 m, získané z Národnej atmosférické observatoře Košetice v intervale od 6.9.2013 – 31.12.2020, ktoré boli využité na výpočet gradientu pre vybrané vrstvy, ktorý určuje, ako sa mení koncentrácia ozónu vo vertikále na 10 m (v práci je uvádzaný v jednotke [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$]). Samotné koncentrácie ozónu vykazujú každoročnú periodicitu s vyššími hodnotami v letnom období (1.4.-30.9.) a nižšími hodnotami v zimnom období (1.10.-31.3.). Spočítaný gradient pre vrstvu 230-50 m vykazuje značnú stabilitu v priebehu roka bez výrazných zmien (rozmedzie hodnôt 0,30-0,43 v zimnom období a 0,30-0,50 v letnom období), čo je v priamom kontraste s gradientom pre vrstvu 50-8 m, ktorá vykazovala podobný periodický chod ako ročné koncentrácie ozónu (rozmedzie hodnôt 0,87-1,82 v zimnom období a 1,55-2,54 v letnom období),. S hodnotami gradientu asi 3-krát menšími než gradient vrstvy 50-8 m a veľmi slabou mierou kolísania hodnôt bola špecifická vrstva 230-8 m (rozmedzie hodnôt 0,44-0,62 v zimnom období a 0,58-0,86 v letnom období),. Jednoznačne najväčšou mierou variability sa prejavil gradient veľmi blízkej prízemnej vrstvy 8-2 m (rozmedzie hodnôt -7,73-0,82 v zimnom období a -4,67-7,62 v letnom období),, ktorého hodnoty boli vysoké a obsahovali približne rovnaký počet kladných i záporných hodnôt, ktoré znamenali pokles koncentrácie ozónu s výškou po hladinu 8 m. Analýzou hodnôt gradientu vyplynulo, že koncentrácia ozónu sa mení rozdielne vo vybraných vrstvách, čo znamená nerovnomerný nárast vo vertikále, ktorý je doplnený o rozdielnu dynamiku koncentrácie ozónu v letnom a zimnom období. Rok 2020 je v dátach poznamenaný všeobecne nižšími hodnotami, ktoré boli ovplyvnené pandemiou covid-19.

Kľúčové slová: znečistenie ovzdušia, vertikálny gradient, znečisťujúce látky, prízemný ozón, aerosol, oxid siričitý, oxidy dusíku

Abstract

Ambient air pollution, caused by harmful pollutants, is considered a severe problem for the natural environment and its components. Effective pollution regulation is possible with reliable data from monitoring stations covering the whole country. Those stations are mainly located at the altitude of 2 m above the surface, possessing their well-known horizontal representativeness. However, the knowledge of the vertical representativeness of these monitoring stations is not sufficient, causing problems while determining the relevance of these measurements for studying the effects of pollutants in various altitudes. The gradient of ozone concentration (determining the change of ozone concentration for each 10 m) was computed to determine the vertical profile of tropospheric ozone (the gradient in this work is using the unit [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$]). Data, containing the ozone concentrations, were measured in altitudes of 2, 8, 50 and 230 m and sourced from the National atmospheric observatory Košetice in the time interval from 6.9.2013 to 31.12.2020. The ozone concentrations show a yearly periodicity, with higher values during the summer period (from 1.4. to 30.9.) and lower values during the winter period (from 1.10. to 31.3.). The gradient for layer 230-50 m outlines considerable stability throughout the year without significant changes (values in interval 0,30-0,43 in the winter period and 0,30-0,50 in the summer period) that is in direct contrast compared to the gradient for layer 50-8 m, the only layer with a yearly periodicity (values in interval 0,87-1,82 in the winter period and 1,55-2,54 in the summer period). The layer 230-8 m differed from layer 50-8 m in a small seasonal variability and gradient values are approximately three times lower (values in interval 0,44-0,62 in the winter period and 0,58-0,86 in the summer period). The gradient of layer 8-2 m contains considerably high values (in the interval -7,73-0,82 in the winter period and -4,67-7,62 in the summer period). The gradient of this layer has a significant amount of negative values, indicating a decrease in ozone concentration from the altitude of 2 m to 8 m. The analysis of gradient values suggested that ozone concentration for each layer is different, indicating an uneven growth in the vertical direction and showing dissimilar dynamics of ozone concentration during summer and winter periods. The gradient variability also testified that measurements in the altitude of 2 m are not entirely relatable with ozone concentrations in higher layers. The dataset for the year 2020 is specific because it has lower values due to the covid-19 pandemic.

Keywords: ambient air pollution, vertical gradient, air pollutants, ground-level ozone, aerosol, sulphur dioxide, nitrogen oxides

Zoznam použitých skratiek

AIM	Automatický imisní monitoring
cO₃	koncentrácia ozónu
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
EEA	Európska agentúra pre životné prostredie
ISKO ČHMÚ	Informační systém kvality ovzduší ČHMÚ
LO	letné obdobie (1.4.-30.9.)
NAOK	Národní atmosférická observatoř Košetice
NO_x	oxidy dusíku
VOC	prchavé organické látky
WHO	Svetová zdravotnícka organizácia
WMO	Svetová meteorologická organizácia
ZO	zimné obdobie (1.10.-31.3.)

Obsah

1 ÚVOD	1
2 ZNEČISŤUJÚCE LÁTKY V OVZDUŠÍ	2
TROPOSFÉRICKÝ OZÓN	3
ATMOSFÉRICKÝ AEROSOL	4
OXIDY DUSÍKU	6
OXID SIRIČITÝ	6
3 DISTRIBÚCIA ZNEČISŤUJÚCICH LÁTOK V OVZDUŠÍ VO VERTIKÁLE	7
FAKTORY OVPLIVŇUJÚCE VERTIKÁLNU DISTRIBÚCIU POLUTANTOV	7
<i>Meteorologické faktory</i>	8
<i>Geomorfologické faktory</i>	9
<i>Vplyv vegetácie</i>	9
<i>Faktor dňa a noci</i>	10
PREVIAZANOSŤ A DISTRIBÚCIA O ₃ -NO _x -VOC VO VERTIKÁLE	10
DISTRIBÚCIA ATMOSFÉRICKÉHO AEROSOLU VO VERTIKÁLE	11
DISTRIBÚCIA SO ₂ VO VERTIKÁLE	11
4 PRAKTICKÁ ČASŤ PRÁCE – VÝPOČET VERTIKÁLNEHO GRADIENTU OZÓNU	12
LOKALITA NAOK A JEJ ŠPECIFIKÁ.....	12
DÁTA	13
METODIKA SPRACOVANIA DÁT	14
<i>Korelačná analýza dát</i>	14
<i>Spracovanie vstupných dát a výpočet gradientu</i>	15
<i>Použitie hodnoty gradientu na výpočet cO₃ v hladine bez prístrojového merania</i>	16
VÝSLEDKY	17
5 DISKUSIA	25
6 ZÁVER	26
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	29
ZOZNAM TABULIEK	31
ZOZNAM OBRÁZKOV	31
A PRÍLOHY	32
PRÍLOHA A1 HODNOTY MEDIÁNOV GRADIENTU V JEDNOTLIVÝCH ROKOCH	32
PRÍLOHA A2 HODNOTY MEDIÁNOV GRADIENTU V ZIMNÝCH A LETNÝCH OBDOBIACH	32
PRÍLOHA A3 POČET PLATNÝCH HODNÔT <i>n</i> PRE JEDNOTLIVÉ VRSTVY A ROKY.....	33

1 Úvod

Znečistenie ovzdušia predstavuje významný problém, ktorého pôvodcom sú mnohé zo skupiny znečisťujúcich látok, veľmi často emitovaných do prostredia najmä z antropogénnych zdrojov (EEA 2022, WHO 2021). Pre lepšiu predstavu o miere znečistenia ovzdušia v určitej oblasti sú vykonávané rôzne merania imisíí polutantov, ktoré musia spĺňať stanovené limity v záujme ochrany zdravia a prírody. Medzi veľmi časté a sledované polutanty patria okrem iných troposférický ozón, oxidy dusíku, atmosférický aerosol a oxid siričitý. Meracie stanice, ktoré sledujú koncentrácie znečisťujúcich látok v ovzduší, majú stanovenú svoju reprezentatívnosť, ktorá je mierou ich spoľahlivosti v horizontálnom smere (ČHMÚ 2021, 2022). Najrozšírenejšie typy staníc naprieč ČR vykonávajú merania imisných koncentrácií vo výške 2 m nad povrchom, pričom nie je dostupných mnoho informácií o tom, ako relevantné sú tieto merania pre štúdium pôsobenia znečisťujúcich látok v inej výške nad zemským povrchom.

Podrobných znalostí o presnom vertikálnom profile polutantov v troposfére nie je veľké množstvo, ich distribúcia sa tiež značne líši od druhu znečisťujúcej látky. Značný podiel v tomto smere tvoria vedecké články, ktoré skúmajú znečistenie na konkrétnej lokalite v konkrétnom čase, kedy veľké zastúpenie majú miesta s vyššou mierou znečistenia alebo lesy (Hůnová et al. 2019, 2020, Karlsson et al. 2006, Samad et al. 2020, Yang et al. 2009). Následne je na základe týchto meraní vytvorený vertikálny profil znečisťujúcej látky, ktorý je ale v určitom smere špecifický pre danú lokalitu s menšou všeobecnou reprezentatívnosťou.

Práve na vertikálnu distribúciu vybraných znečisťujúcich látok, faktory ktoré ju ovplyvňujú a základnú charakteristiku skúmaných polutantov je zameraná teoretická časť tejto práce.

V praktickej časti práce je venovaná pozornosť troposférickému ozónu, ktorého koncentrácie v 4 rôznych hladinách vo vertikále, získané od ČHMÚ z lokality Národní atmosférické observatoře Košetice, boli využité na výpočet gradientu vo vybraných vrstvách, pomocou ktorého je možné lepšie objasniť vertikálny profil ozónu v sledovanom rozmedzí, mieru jeho zmeny a prípadnej variability medzi jednotlivými vrstvami. Výpočet gradientu koncentrácie ozónu pre vybrané vrstvy má teda za cieľ objasniť reprezentatívnosť meracích staníc vo výške 2 m nad povrchom pre určovanie miery záťaže vo vyšších hladinách vertikály.

Pred spracovaním získaných hodnôt pre výpočet gradientu boli vyslovené dve hypotézy, ktorých správnosť bola overovaná v samotnej praktickej časti za využitia získaných výstupov. Prvou hypotézou je tvrdenie, že zmena koncentrácie ozónu vo vertikálnom profile nie je rovnomerná.

Druhú hypotézu predstavuje tvrdenie, že zmena koncentrácie ozónu vo vertikále sa mení rozdielne v letnom a zimnom období.

V poradí treťou hypotézou vyslovenou pre túto prácu je tvrdenie, že hodnota koncentrácie ozónu nameraná v hladine 2 m nad povrchom nie je plne vypovedajúca pre vyššie hladiny.

2 Znečisťujúce látky v ovzduší

Ovzdušie je všade okolo nás, vyplňa voľný priestor, tvorí prostredie, v ktorom sa nachádzame a umožňuje nám prežiť, pretože ho mimo iné tvorí vzduch, zmes plynov, ktorý dýchame a ktorý potrebujeme. Z tejto veľmi úzkej naviazanosti nielen ľudstva na ovzdušie možno vyvodit' našu veľkú zraniteľnosť, pretože dýchacia sústava predstavuje najrýchlejšiu a najjednoduchšiu cestu do organizmu – to, čo sa dostane do dýchacích ciest, to sa zároveň dostane aj do vnútra samotného organizmu, pričom platí, že čím je daná cudzorodá látka či častica menšia, tým ľahšiu cestu má. Táto informácia predstavuje dôležitý dôvod na to, aby bolo ovzdušie udržiavané v čo najlepšom stave bez výrazného znečistenia, ktoré ohrozuje priamo veľkú časť živých tvorov na Zemi. Aktuálne poznatky však upozorňujú na fakt, že skutočnosť je úplne iná a znečistenie ovzdušia predstavuje veľký problém (nie iba) súčasnosti, priamo negatívne vplýva na zdravie, spôsobuje predčasné úmrtia, rozvoj rôznych (nielen respiračných) ochorení, z ktorých najzávažnejšie sa javia tie, ktoré zasahujú priamo kardiovaskulárnu sústavu, pričom podľa Svetovej zdravotníckej organizácie (World Health Organization, WHO) bolo toto ochorenie v roku 2016 dôvodom až 58 % (z celkového celosvetového počtu 4,2 milióna) predčasných úmrtí následkom znečistenia vonkajšieho ovzdušia (WHO 2021). Ďalej WHO uvádza, že v roku 2019 žilo až 99 % svetovej populácie na miestach, ktorých ovzdušie bolo znečistené vo väčšej miere, než to pripúšťajú smerné úrovne od WHO, pričom dlhodobo najväčší problém predstavujú suspendované častice PM_{2,5}, ktoré sú schopné preniknúť až priamo do krvného obehu (WHO 2021).

Problém so znečisteným ovzduším má aj Európa (najmä stredná a východná, spolu s Talianskom), pričom podľa Európskej agentúry pre životné prostredie (EEA) až 96 % mestskej populácie v Európskej únii bolo vystavenej ovzdušiu znečistenému viac, než to pripúšťajú najnovšie smerné hodnoty WHO (EEA 2022). V 27 členských štátoch bolo v roku 2019 zaznamenaných až 307 000 predčasných úmrtí vplyvom expozície znečistenému ovzdušiu, najmä PM (EEA 2021a). V porovnaní s rokom 2018, kedy bolo zaznamenaných 379 000 predčasných úmrtí v členských štátoch, sa jedná o pokles, avšak je potrebné zdôrazniť, že štatistika pre rok 2018 bola vytvorená pre 28 členských štátov EU (vrátane Veľkej Británie), pričom rok 2019 bol spracovaný len z údajov od 27 členských štátov (EEA 2021b).

Na nasledujúcich stranách sú zhrnuté dôležité poznatky o škodlivosti, zdrojoch a významných reakciách 4 látok, ktoré predstavujú problém pre čisté ovzdušie – jedná sa o troposférický ozón (O_3), aerosolové častice (PM), oxidy dusíku (NO_x) a oxid siričitý (SO_2).

Troposférický ozón

O_3 je z chemického hľadiska trojatómovou molekulou kyslíku, ktorá v atmosfére zohráva dôležitú úlohu, keď v nej ako stratosférický ozón tvorí ozónovú vrstvu chrániacu živé organizmy na Zemi pred škodlivými frekvenciami UV žiarenia. Okrem stratosféry sa však O_3 môže vyskytovať aj v troposfére ako troposférický O_3 , pričom jeho výskyt v tejto vrstve atmosféry je považovaný za problematický, pretože negatívne ovplyvňuje faunu a flóru – je považovaný za znečisťujúcu látku ovzdušia so zotrvaním okolo 20 dní (Fowler et al. 2020). Troposférický ozón nie je do ovzdušia emitovaný priamo, ale jedná sa o sekundárnu škodlivinu vznikajúcu fotochemickými reakciami z prekursorov, z ktorých najvýznamnejšími sú NO_x a prchavé organické látky (Volatile Organic Compounds, VOC) (Hůnová 2018). Zatiaľ čo NO_x sa do ovzdušia dostávajú zo všetkých spaľovacích procesov (veľmi často z exhalácií z dopravy), pri VOC je situácia trochu zložitejšia. VOC sa môžu do ovzdušia dostávať antropogénnym znečisťovaním, ale aj z prírodných zdrojov, ktoré sa v regionálnej miere podieľajú na emisiách VOC do ovzdušia z väčšej miery, ako zdroje antropogénne (Seinfeld 2004). Medzi najčastejšie VOC z prírodných zdrojov, ktoré sa dostávajú do ovzdušia, patria izoprén a terpény, ktoré sú produkované najmä ihličnatými stromami.

Ozón je bezfarebný plyn a je taktiež indikátorom výskytu letného oxidačného smogu. Tento smog, označovaný tiež ako losangelský, bol prvýkrát pozorovaný v kalifornskom Los Angeles, ktoré je značne zaťažené automobilovou dopravou, poskytujúcou dostatočné množstvo prekursorov na tvorbu ozónu. Tento typ smogu vyžaduje letné počasie s teplotami nad $25\text{ }^\circ\text{C}$, pretože prebiehajúce reakcie, produkujúce znečistenie, sú fotochemické a okrem tvorby ozónu tu vznikajú aj ďalšie škodlivé látky, napríklad peroxyacetylnitrát PAN, kyselina mravčia a dusičná spolu s ďalšími radikálmi a sekundárnymi aldehydami (Hůnová and Janoušková 2004, Kočová et al. 2005).

Pôsobenie ozónu na ľudské zdravie a vegetáciu je škodlivé, pričom ako plyn má najväčší vplyv na dýchaciu sústavu (sliznice a pľúca), ale tiež významne dráždi oči, spôsobuje bolesti hlavy, kašeľ a predstavuje riziko pre astmatikov (Hůnová and Janoušková 2004). Pokiaľ je ozón v ovzduší spolu s ostatnými látkami súčasťou letného smogu, negatívne účinky na organizmus sa ešte zosilňujú spoločným vplyvom týchto látok (Kočová et al. 2005). Ozón ako silné oxidačné činidlo negatívne vplýva aj na zdravie vegetácie, kedy jeho schopnosť rozbíjať dvojné väzby

rozkladá chlorofyl prítomný v zelených častiach rastlín, čo znemožňuje rastline fotosyntézu. Ozón sa k chlorofylu, uloženému v chloroplastoch, dostáva cez rastlinné prieduchy a rastlinu, ktorá je zasiahnutá pôsobením ozónu a rozkladom chlorofylu, je možné spoznať na základe zožltnutia listu, ktoré sa postupne šíri ďalej (Kočová et al. 2005). Rastlina zasiahnutá ozónom horšie odoláva kyslým dažďom, pričom všeobecne viac sú kyslými dažďami ohrozené ihličnaté lesy, ktoré sú neopadavé a vystavené tomuto pôsobeniu celoročne (Kočová et al. 2005).

Hlavnou reakciou, ktorou vzniká ozón v troposfére, je rozklad oxidu dusičitého NO_2 fotolýzou, pričom vzniká oxid dusnatý NO a kyslíkový radikál $\text{O}(^3\text{P})$, ktorý následne zlúčením sa s molekulárnym kyslíkom O_2 tvorí molekulu ozónu O_3 . Vypúšťanie oxidov dusíku do ovzdušia vplyvom dopravy nepredstavuje významný zdroj NO_2 , pretože tie sú emitované do ovzdušia z veľkej časti vo forme NO (Braniš et al. 2009). Významným zdrojom NO_2 v ovzduší je však reakcia hydroxyl- alebo peroxyradikálu s NO , ktorou vzniká už spomínaný NO_2 . Hydroxyl- alebo peroxoradikály v atmosfére vznikajú reakciou VOC alebo oxidu uhoľnatého CO s radikálom OH – táto reakcia prebieha v prípade vysokého pomeru medzi VOC a NO_2 a priamo propaguje tvorbu ozónu. V prípade nízkeho pomeru medzi VOC a NO_x reaguje OH radikál viac s NO_2 a prebieha jeho odstránenie zo systému (Braniš et al. 2009). Pokiaľ je touto reakciou odstraňovaný OH radikál z ovzdušia, tak môže NO odstraňovať ozón z ovzdušia, pretože reakciou NO a O_3 vzniká NO_2 a O_2 .

Pri snahe o reguláciu tvorby troposférického ozónu je potreba sa bližšie zamerať na samotné NO_x a VOC, ktoré predstavujú hlavné prekurzory O_3 , pričom je neefektívne regulovať iba jeden druh polutantu, ale oba naraz (Seinfeld 2004). Z chemických reakcií vyššie tiež vyplýva, že vplyv na tvorbu ozónu (cez reakcie s OH radikálom) má CO , ale aj metan CH_4 (Fowler et al. 2020). Ako pomerne zložitá na prevedenie sa javí regulácia VOC prírodného pôvodu, pretože tieto emisie sú prírodné a nemožno na ne účinne stanoviť limity.

Atmosférický aerosol

Ďalšou skupinou látok, ktoré znečisťujú ovzdušie, sú tie, ktoré sú súhrnne označované ako atmosférický aerosol. Jedná sa o pomerne širokú a typovo aj veľkostne diverzifikovanú skupinu znečisťujúcich látok, ktoré sa do ovzdušia dostávajú z antropogénnych, ale veľmi často aj z prírodných zdrojov. Samotný atmosférický aerosol je definovaný ako súbor suspendovaných tuhých a kvapalných (alebo ich zmes) častíc v atmosfére, ktorých veľkosť sa pohybuje v rozmedzí 1 nm až 100 μm , pričom ovplyvňujú množstvo dejov v atmosfére (tvorba zrážok, energetická bilancia Zeme), ale zároveň predstavujú aj potencionálnu hrozbu z dôvodu schopnosti rôznych toxických látok sa na ne viazať (Braniš et al. 2009). Aerosol, ktorý sa do atmosféry dostáva napr.

spaľovaním palív má antropogénny pôvod, zatiaľ čo aerosol pôvodom z mora či vulkánov je prírodného pôvodu. Pokiaľ sa čistočky aerosolu emitujú priamo do atmosféry, tak sa jedná o primárny aerosol, ale pokiaľ v atmosfére vznikajú nukleáciou, tak sú označované ako sekundárny aerosol. Medzi aerosol tiež patria rôzne baktérie, vírusy, huby alebo spóry, ktoré predstavujú bioaerosol (Braniš et al. 2009). Vlastnosťou, ktorá vo veľkej miere ovplyvňuje úroveň škodlivosti aerosolu, je jeho veľkosť, pričom čím je aerosolová častica menšia, tým je zvyčajne škodlivejšia, pretože dokáže preniknúť hlbšie do organizmu. Zvýšená pozornosť by teda mala byť venovaná časticiam PM_{10} a $PM_{2.5}$, kde frakcia PM_{10} obsahuje všetky častice od 1 nm – 10 μm (aj frakciu $PM_{2.5}$), zatiaľ čo frakcia $PM_{2.5}$ obsahuje iba častice po veľkosť 2,5 μm . Častice $PM_{2.5}$ sú teda veľmi malého priemeru a pri väčšej a dlhodobejšej expozícii sa jedná o veľmi nebezpečné znečisťujúce látky, ktoré vďaka svojej veľkosti dokážu prenikať až do krvného obehu – pre túto svoju vlastnosť sú sledované a majú stanovené legislatívne limity pre ochranu zdravia.

Atmosférický aerosol spôsobuje v závislosti na zložení rôzne typy vizuálne odlišiteľného znečistenia, ktoré majú spoločnú vlastnosť, a to tú, že svojou absorpciou a rozptylom na svojom povrchu zhoršujú viditeľnosť. Zlepšenie viditeľnosti možno dosiahnuť redukciami organických látok, síranov, dusičnanov a čierneho uhlíku z ovzdušia, pričom vo vlhkom prostredí je to hlavne redukcia síranov a dusičnanov (Seinfeld 2004).

Expozícia atmosférickému aerosolu je zdraviu škodlivá, ale reálne sa jej nedá vyhnúť, pretože sa nachádza všade naokolo. Medzi akútne prejavy patrí podráždenie dýchacej sústavy alebo slizníc, pričom dôležitý význam má aerosol aj pri alergiách alebo astme. Vplyv aerosolu môže byť však aj veľmi škodlivý, najmä pri frakcii $PM_{2.5}$, ktorá môže prispievať k vzniku astmy, rozvoju kardiovaskulárnych ochorení alebo až k prečasným úmrtiam.

Atmosférický aerosol môže byť z atmosféry odstraňovaný v závislosti na veľkosti častíc rôzne, avšak najväčší podiel na celom procese má atmosférická depozícia. Pri menších časticiach, nachádzajúcich sa v atmosfére, sa najčastejšie uplatňuje mokrá depozícia, kedy sú tieto častice z atmosféry vymyté zrážkami a vypršia sa na zemský povrch. Pri malých časticiach sa ešte uplatňuje aj koagulácia alebo kolízia medzi malou a väčšou časticou, pričom tento proces má vplyv najmä na odstraňovanie malých častíc (Seinfeld 2004). Veľké častice atmosférického aerosolu sú odstraňované suchou depozíciou, kedy klesajú k zemskému povrchu dôsledkom gravitačného pôsobenia vzhľadom k ich veľkosti.

Oxidy dusíku

Dusík je v atmosfére prítomný vo veľkom zastúpení ako jeho molekulová forma N_2 , ktorá má 78% podiel na zložení vzduchu, ktorý dýchame. Pokiaľ sa dusík vyskytuje v atmosfére mimo túto molekulu v iných zlúčeninách, tak býva označovaný ako reaktívny dusík s krátkou dobou zotrvania (Moldan 2015). Medzi takéto dusíkaté zlúčeniny patria oxidy dusíku, ktoré predstavujú skupinu, do ktorej sa bežne radí oxid dusný (N_2O), oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO_2) a oxid dusičný (N_2O_5). N_2O pochádza najčastejšie z biologických zdrojov (napríklad činnosť pôdnych baktérií alebo z poľnohospodárstva) a jeho reaktivita v atmosfére je veľmi nízka vplyvom jeho stability. Do skupiny plynov NO_x sa zaraďujú NO a NO_2 , ktoré sa do ovzdušia dostávajú najmä spaľovacími procesmi, pri ktorých dochádza k oxidácii molekulárneho dusíku za vysokých teplôt (Braniš et al. 2009). Spaľovacie procesy z väčšej časti produkujú najmä NO, veľké množstvo NO_2 sa nimi do ovzdušia priamo nedostáva (vzniká napríklad oxidáciou NO). NO_2 predstavuje plyn škodlivý pre ľudské zdravie, a preto sú na jeho imisné koncentrácie nastavené legislatívne limity. Oxidy dusíku môžu mať aj svoj prirodzený zdroj, ktorým sú elektrické výboje počas búrok.

Ako vhodným riešením pri znižovaní antropogénnych emisií NO_x do ovzdušia sa javí podpora mikromobility a využívanie ekologickejších spôsobov dopravy (elektrické vlaky alebo vo všeobecnosti hromadná doprava), ktoré môžu viesť k znižovaniu záťaže prostredia nadmerným využívaním automobilovej osobnej dopravy. Technologický pokrok s optimalizáciou technológií využívaných v automobiloch tiež môže prispieť k zníženiu emisií NO_x , najmä zefektívnením katalyzátorov alebo prísnejšími limitmi na technologický stav vozidiel.

Oxid siričitý

Oxid siričitý je historicky pomerne dobre známym polutantom, najmä v oblastiach, ktoré boli v minulosti silne zaťažené priemyslom. Do ovzdušia sa SO_2 dostáva najčastejšie zo spaľovacích procesov v priemysle alebo v energetike, najmä palív, ktoré obsahujú síru – typicky je to menej kvalitné hnedé uhlie (Braniš et al. 2009, Seinfeld 2004). Emisie SO_2 sa do ovzdušia dostávajú aj z lodnej dopravy (Mocerino et al. 2020).

SO_2 predstavoval veľký problém pre priemyselné oblasti a veľké sídla, pokiaľ sa jeho väčšie koncentrácie spojili s nepriaznivými rozptylovými podmienkami (inverzia a zvýšená vzdušná vlhkosť) a ďalšími emisiami v ovzduší, pričom kombináciou týchto podmienok dochádzalo ku vzniku redukčného zimného smogu. Tento typ smogu sa tiež označuje ako londýnsky smog, z dôvodu jeho častého výskytu v britskej metropoli, kde bola taktiež v roku 1952 zaznamenaná veľmi vážna epizóda tohto smogu, ktorá spôsobila tisíce úmrtí na následky znečisteného ovzdušia.

Okrem Londýna boli vážne epizódy redukčného smogu zaznamenané aj na iných miestach sveta, napríklad v USA v pennsylvánskom meste Donora, pričom prítomnosť tohto typu smogu je špecifická výrazným zhoršením viditeľnosti (Seinfeld 2004). Znečistením hlavne vplyvom SO₂ malo významne zasiahnuté oblasti aj bývalé Československo, najmä v pohraničnom území s Poľskom a dnešným Nemeckom, kedy v tejto oblasti bol koncentrovaný ťažký priemysel, ťažba a energetika, čo danú lokalitu znečistilo tak významným spôsobom, že sa pre ňu zaužívalo označenie „Čierny trojuholník“.

Okrem tvorby redukčného smogu v zimnom období, predstavuje prítomnosť SO₂ v ovzduší problém aj z dôvodu jeho oxidácie na SO₃ a následnej reakcie s OH radikálom, pri ktorej sa tvorí kyselina sírová H₂SO₄, ktorá následne okysľuje zrážkovú vodu a spôsobuje kyslé dažde. Kyslé dažde negatívne vplyvajú na pôdu jej acidifikáciou, čo má za následok ničenie najmä ihličnatých lesov, pričom tento jav bol v minulosti pozorovaný vo veľkej miere v Škandinávii, kam sa znečistenie dostalo diaľkovým prenosom z Veľkej Británie (Fowler et al. 2020).

SO₂ sa z atmosféry odstraňuje najúčinnjšie mokrou depozíciou v zrážkovej vode a v hmlách, ale možno pozorovať aj suchú depozíciu na zemský povrch, vegetáciu a vodné plochy (Braniš et al. 2009). Problém s SO₂ sa v dnešnej dobe vďaka masívnemu odsírovaniu výroby od 90. rokov 20. storočia zúžil už prakticky iba na menšie sídla (často v údoliach), ktorých hlavným spôsobom vykurovania je spaľovanie dreva alebo uhlia.

3 Distribúcia znečisťujúcich látok v ovzduší vo vertikále

Atmosféra predstavuje dynamický systém, ktorý je špecifický svojou variabilitou a komplexnosťou. Túto informáciu je potrebné vziať do úvahy pri opisovaní vertikálnej distribúcie znečisťujúcich látok, pretože práve spomínaná variabilita a komplexnosť znamenajú, že distribúcia látok vo vertikálnom profile nebude nemenná, a taktiež nebude mať stále rozloženie a koncentračné gradienty. Zo známych vedomostí je možné určiť približné správanie sledovaných polutantov vo vertikále, ale práve pre dynamickosť atmosféry je lepšie sa bližšie zamerať na procesy alebo skutočnosti, ktoré zásadným spôsobom vplyvajú na koncentrácie látok v ovzduší a na ich výškový profil.

Faktory ovplyvňujúce vertikálnu distribúciu polutantov

Na mieru koncentrácie polutantov v atmosfére má vplyv množstvo faktorov, pričom najzákladnejším predpokladom je to, že koncentrácie škodlivých látok sú v ovzduší zvyčajne

najvyššie v okolí ich zdrojov, čo naznačuje výraznejšie zaťaženie najspodnejšej prízemnej vrstvy troposféry väčším množstvom polutantov.

Meteorologické faktory

Veľmi významný faktor, vplyvajúci na vertikálnu distribúciu škodlivín, predstavujú meteorologické podmienky, ktoré sú hybateľom mnohých zmien v atmosfére – tradične medzi ne patria slnečné žiarenie, teplota, rýchlosť a smer vetru, relatívna vzdušná vlhkosť, stabilita atmosféry alebo zrážky (Chi et al. 2018, Yang et al. 2009).

Slnečné žiarenie má veľký význam pri priebehu fotochemických reakcií ako ich iniciátor, pričom fotochemickými reakciami sa v atmosfére tvoria viaceré látky, z ktorých je pre túto prácu najvýznamnejší práve ozón. Slnečné žiarenie je tiež hybateľom konvektívneho premiešavania atmosféry, ktoré sa významným spôsobom podieľa na rovnomernom rozložení znečisťujúcich látok vo vertikále (Chi et al. 2018).

Teplota vzdušnej hmoty definuje mieru a typ znečistenia s previazanosťou na vzdušnú vlhkosť, kedy vyššie teploty spolu so suchami vplyvajú na vyššiu mieru prašnosti a tvorbu letného smogu fotochemickými reakciami, pričom v zimnom období s nižšími teplotami a vyššou vzdušnou vlhkosťou, sa znečistenie viaže na vzdušnú vlhkosť a jeho zdržanie v atmosfére je dlhšie, čo môže znamenať aj tvorbu redukčného smogu.

Vietor, jeho sila a smer, účinne ovplyvňujú koncentrácie polutantov v ovzduší, pretože premiešavajú vrstvu vzduchu v horizontále i vo vertikále. Vo vertikále má významný vplyv konvektívne prúdenie, ktoré dokáže prenášať znečistenie z nižších, viac znečistených vrstiev troposféry, do vyšších s čistejším vzduchom, pričom sa tieto hladiny vzájomne premiešajú a koncentrácia škodlivín sa v ovzduší účinne nariedi. Prenos v horizontálnom smere má tiež veľký význam, pretože môže znečistenie z jednej lokality prenášať na inú, viac vzdialenú lokalitu (ktorá nemusí mať významné zdroje znečistenia), pričom v tomto prípade je tento jav označovaný ako diaľkový prenos znečistenia - veľmi často je možné tento fenomén pozorovať vo vzdialenejších obciach po smere vetra od väčších miest a aglomerácií.

Atmosférické zrážky slúžia ako účinný sink (prepad) znečisťujúcich látok z ovzdušia, kedy sa nimi znečistenie vymýva z atmosféry. Problém nastáva, pokiaľ je znečistenia veľa alebo keď reaguje so zrážkami a významne ich okysľuje, čím sa tvoria pre životné prostredie škodlivé kyslé zrážky.

Veľkú pozornosť si vyžaduje posledný spomínaný faktor, ktorým je miera stability atmosféry. Zhoršenie rozptylovej situácie nastáva pri vzniku inverzie, ktorej vznik je sledovaný v období zvýšenej tlakovej záťaže (Samad et al. 2020). Pri inverzii vzniká v určitej výške nad zemským povrchom nepriepustná vrstva, ktorá zamedzuje konvektívnemu prúdeniu a všetko vyprodukované

znečistenie drží medzi jej hranicou a zemským povrchom, čo významne zhoršuje kvalitu ovzdušia pod zádržnou vrstvou, pričom vzduch nad inverznou vrstvou býva spravidla čistý. Inverzná vrstva môže byť rozrušená silným prúdením alebo dostatočne silným slnečným žiarením (Schnitzhofer et al. 2009).

Geomorfologické faktory

Jedným z najvýraznejších prostriedkov ovplyvňujúcich koncentrácie a rozvrstvenie škodlivých látok vo vertikále je, ako už bolo spomínané, prúdenie horizontálne aj vertikálne. Vychádzajúc z tejto informácie, možno teda usúdiť, že látkové pomery sa na rovnom povrchu vo vertikále môžu meniť pomocou konvektívneho vertikálneho prúdenia a horizontálneho prúdenia, pričom ich kombinácia vedie k účinnejšej obmene znečisteného vzduchu. Z tohto dôvodu preto predstavujú nížiny a údolia značný problém, pretože prúdenie v nich je umožnené iba v jasne definovaných smeroch – zvyčajne je možné vo vertikále a v obmedzenom smere aj horizontálne (v údolí). Okrem značnej členitosti komplikujúcej prúdenie vzduchu sú údolia špecifické častým vznikom inverzií, ktoré spôsobujú akumuláciu škodlivín pri zemskom povrchu (spolu s ťažším rozbitím zádržnej vrstvy). Situácia s ovzduším v údolí môže byť značne nepriaznivá najmä v prípadoch, kedy je dané údolie zaťažené dopravou alebo priemyslom, ktoré produkujú zvýšené množstvo emisií. V takýchto prípadoch môže dochádzať k dlhšiemu zadržovaniu vyšších koncentrácií polutantov v týchto oblastiach, čo napríklad ilustruje výstup z meraní v Inntal (údolie rieky Inn v rakúskom Tyrolsku) (Schnitzhofer et al. 2009).

Vplyv vegetácie

Rastliny majú v zmysle ovplyvňovania vertikálnej distribúcie polutantov pomerne zvláštne postavenie, pretože expozíciou týmito látkam môžu byť poškodzované (kyslé dažde, pôsobenie ozónu), dokážu tieto polutanty pomáhať odstraňovať z ovzdušia (napríklad spotreba oxidu uhličitého na fotosyntézu), ale dokážu ich aj ako ich zdroj do ovzdušia emitovať (napríklad VOC). Okrem vychytávania oxidu uhličitého majú rastliny význam aj ako sink ozónu v lesných ekosystémoch, kde ho pomáhajú odstraňovať z ovzdušia – podľa jednej štúdie boli koncentrácie ozónu v lesnom poraste redukované o 3-4 % v priebehu dňa a cez noc dokonca až o 10-40 % (Karlsson et al. 2006, Krzyzanowski 2004). Takýto vplyv na ozón môžu mať lesné porasty okrem iného aj napríklad preto, že z pôdy sa uvoľňuje NO, ktorý jeho reakciou s O₃ predstavuje jeho sink (Skelly et al. 1996).

Pomerne zaujímavé zistenie priniesla štúdia zaoberajúca sa skúmaním vplyvu mestskej vegetácie v uliciach Aucklandu na Novom Zélande na transport polutantov v ovzduší. Zeleň v mestách pomáha znižovať spotrebu energií svojím prirodzeným chladiacim efektom, zadržiava

vodu, znižuje hluk a tvorí biotop pre živočíchy, pričom podľa dostupných zistení ale v prípade prítomnosti listov tvorí bariéru pre transport polutantov od zdrojov (doprava) do vyšších vrstiev (značne obmedzuje konvektívne prúdenie), čo má za následok akumuláciu škodlivín v podkorunovej vrstve – zároveň ale bola vyslovená nezodpovedaná otázka, či pri obmedzení konvektívneho prúdenia z vyšších častí vertikály nie je s čerstvým vzduchom blokový aj transport ozónu do nižších vrstiev, čo predstavuje zaujímavú myšlienku (Salmond et al. 2013).

Faktor dňa a noci

Striedanie dňa a noci má veľký význam na atmosférickú chémiu aj na koncentrácie škodlivých látok v atmosfére. V priebehu dňa je väčšina antropogénnych emisií na vysokých úrovniach, prebiehajú aj mnohé fotochemické reakcie, napríklad tvorba O_3 . Slnčné žiarenie taktiež zahrieva zemský povrch, čo následne poháňa konvektívne prúdenie vzduchu, premiešava stĺpec vzduchu a rozptyľuje znečistenie vo vertikále.

V priebehu noci je veľké množstvo antropogénnych aktivít a s nimi súvisiacich emisií na minime, zemský povrch nie je zahrievaný slnečným žiarením, čo zastaví konvektívne prúdenie vzduchu a dochádza k stabilnej stratifikácii najmä O_3 s veľmi malými koncentraciami v prízemnej vrstve a pomerne vysokými koncentraciami vo vyšších vrstvách (Chi et al. 2018).

Previazanosť a distribúcia O_3 - NO_x -VOC vo vertikále

Koncentrácia O_3 v ovzduší a jej priebeh je významným spôsobom determinovaná faktom, že sa jedná o sekundárny polutant, ktorý vzniká z prekursorov fotochemickou reakciou. Jeho množstvo a tvorba sú teda priamo závislé na koncentrácii jeho prekursorov v ovzduší spolu s prítomnosťou vhodných podmienok na jeho tvorbu v troposfére. Látkami, ktoré slúžia ako prekursor pre vznik O_3 , sú NO_x a VOC, čo znamená, že pri určovaní vertikálneho profilu troposférického ozónu je vhodné uvažovať aj vertikálnu distribúciu týchto prekursorov v rámci jedného systému O_3 - NO_x -VOC.

Dynamika atmosférických procesov v priebehu dňa a noci je podstatne odlišná, čo má za následok aj rozdielne reakcie v nej prebiehajúce. Ako už bolo uvádzané, zatiaľ čo cez deň pôsobením slnečného žiarenia prebieha fotochemický vznik ozónu z prekursorov a premiešavanie vertikály vplyvom konvektívneho prúdenia, v noci je toto prúdenie zastavené, vertikála sa stratifikuje a prebieha odbúravanie škodlivín vplyvom nočnej chémie (Geyer 2004).

Pokles koncentrácie ozónu v nižších vrstvách je spôsobený jeho depozíciou na povrch a jeho reakciou s NO, čím sa odstraňuje z atmosféry. Nočná chémia má teda významný vplyv na odstraňovanie polutantov ako ozón a VOC (odstraňované oxidáciou) z prízemnej vrstvy

troposféry, pričom je vo veľkej miere závislá na výške nad povrchom – týmito reakciami vznikajú rôzne gradienty O_3 a NO_x , kde koncentrácia NO smerom k povrchu rastie (vplyvom jeho emisií), koncentrácia NO_2 smerom k povrchu taktiež rastie (vplyvom titrácie O_3 oxidom dusnatým) a zároveň sa z ovzdušia odstraňuje suchou depozíciou a koncentrácia O_3 smerom k povrchu klesá z dôvodu jeho odstraňovania reakciou s NO (Geyer 2004, Shaw et al. 2015). Vertikálny profil VOC je podobný tomu od NO_x , kedy ich koncentrácia smerom k povrchu rastie, pričom táto informácia platí pre normálne podmienky v atmosfére a nemožno ju uvažovať v inverznej situácii, kedy je profil vo vertikále zložitý (počiatočný pokles s výškou sa v určitej hladine zlomí a nasleduje nárast po určitú vyššiu hladinu) (Lin et al. 2011).

Distribúcia atmosférického aerosolu vo vertikále

Atmosférický aerosol so svojou veľkostnou a typovou variabilitou predstavuje rôznorodú skupinu, ktorá zahŕňa množstvo druhov častíc z množstva antropogénnych a prírodných zdrojov. Takáto významná heterogenita celej skupiny má zásadný vplyv aj na vertikálnu distribúciu aerosolových častíc. Možno povedať, že častice väčšieho priemeru a častice ťažšie sa budú z atmosféry odstraňovať rýchlejšie vplyvom gravitáciou poháňanej sedimentácie, než častice malého priemeru, ktoré majú tendenciu v ovzduší zotrvať dlhšie, ich usadzovanie je pomalšie a môžu byť transportované na väčšie vzdialenosti vplyvom diaľkového prenosu (Samad et al. 2020). Koncentrácia aerosolu v troposfére vo všeobecnosti klesá so stúpajúcou výškou nad povrchom, pričom tento trend je ovplyvňovaný obsahom vodnej pary v ovzduší a špecifikami oblasti (Braníš et al. 2009).

Výskum atmosférického aerosolu na Ústavu pro životní prostředí Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy má dôležité zastúpenie, pričom merania neprebiehajú len na stacionárnych staniách, ale sú vykonávané aj za využitia diaľkovo ovládanej vzducholode, pomocou ktorej sa merajú koncentrácie atmosférického aerosolu v rôznych oblastiach, napríklad nad hnedouhoľným dolom (Esterlová 2018, Hovorka et al. 2016).

Distribúcia SO_2 vo vertikále

Koncentrácie SO_2 v ovzduší sú tiež, ako pri predchádzajúcich polutantoch, významne závislé od meteorologickej situácie, pričom významný vplyv má vzdušná vlhkosť, ktorá znečistenie zadržiava (Yang et al. 2009). Distribúcia vo vertikále je závislá na prítomnosti zdrojov emisií, kedy koncentrácie so stúpajúcou výškou klesajú, na čo má vplyv sila a smer prúdenia v atmosfére, prítomnosť inverzie alebo vykurovacia sezóna v určitých oblastiach, čo môže mať vplyv na

vertikálny profil, kedy sa môžu vyskytnúť nepravidelnosti – napríklad pri štúdiu znečistenia ovzdušia v čínskom Pekingu boli v pozorovanom období zaznamenané najvyššie koncentrácie v hladine okolo 50 metrov nad povrchom (Yang et al. 2009).

4 Praktická časť práce – Výpočet vertikálneho gradientu ozónu

Lokalita NAOK a jej špecifiká

Verifikované merania koncentrácií O₃ (cO₃) v rôznych výškových hladinách, ktoré boli spracovávané a využité na ďalšie výpočty, pochádzajú z Národnej atmosférické observatoře Košetice (NAOK).

Observatórium Košetice sa nachádza v nadmorskej výške 535 m, v katastrálnom území obce Křešín (okres Pelhřimov) v kraji Vysočina. Okolie stanice je tvorené pahorkatou (svažitosť nad 10%), poľnohospodársky využívanou krajinou s prevahou ornej pôdy, s menším podielom zalesneného územia (ČHMÚ 2022). Severne a západne od observatória tečie krajinou Martinický potok, patriaci do povodia Želivky. Priemerná teplota v lokalite dosahuje 8,1 °C, úhrn zrážok má priemer 649 mm a prevláda tu západné prúdenie (ACTRIS 2022a).

V okolí observatória Košetice nie je prítomný žiadny významný zdroj antropogénneho znečistenia, čo observatórium klasifikuje ako stanicu reprezentujúcu pozad'ové znečistenie Českej republiky a strednej Európy, pričom samotná reprezentatívnosť stanice je oblastná s rozsahom desiatok až stoviek kilometrov (ČHMÚ 2022). Merania prebiehajúce na stanici dodržiavajú pravidlá a zásady stanovené Svetovou meteorologickou organizáciou (WMO), pričom okrem iného patrí stanica aj do Sítě včasného zjištění, ktorá monitoruje radiačnú situáciu v ovzduší naprieč ČR (ACTRIS 2022a). V rámci činnosti stanice prebiehajú merania aj v Malom lesnom povodí, z ktorých získané údaje slúžia na lepšie znalosti o toku látok v malom lesnom ekosystéme (ČHMÚ 2022a).

NAOK predstavuje významnú stanicu a zdroj dát nielen v ČR, ale aj za jej hranicami, najmä z dôvodu jej reprezentatívnosti aj pre strednú Európu, čo je doložené účasťou observatória Košetice v programoch EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), ICP-IM (International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems), GAW (Global Atmosphere Watch) a ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure Network) (ACTRIS 2022b, ČHMÚ 2022a).

Väčšina dát využívaných v tejto práci bolo získaných z meracích zariadení umiestnených na atmosférickom stožiar, ktorý na tieto účely slúži od svojho vzniku v roku 2012 a jeho prevádzku

zabezpečuje Ústav výzkumu globální změny Akademie věd ČR (ACTRIS 2022c). Stožiar je vysoký 250 m a je zaradený do medzinárodnej monitorovacej siete ICOS (Integrated Carbon Observation System), pričom zabezpečuje merania koncentrácií skleníkových plynov a atmosférických polutantov spolu so sledovaním fyzikálno-chemických vlastností aerosólov (ACTRIS 2022c).

Dáta

Na ďalšie spracovanie boli v tejto práci využité dáta nameraných CO_2 z 3 výškových hladín, v ktorých meranie troposférického O_3 na stožiaroch prebieha – a to v hladinách 8, 50 a 230 m. Tieto merania sú vykonávané za využitia rovnakej technológie, ktorou je prístroj Thermo 49i (ACTRIS 2022d), ktorý vykonáva stanovenie ozónu v ovzduší na základe UV fotometrickej analýzy (ThermoFisher Scientific 2022).

Okrem CO_2 z hladín 8, 50 a 230 m boli spracovávané aj CO_2 získané vo výške 2 m pomocou merania AIM (Automatický imisný monitoring), ktoré meria prízemný O_3 metódou UV-absorpcie – tieto merania majú v Košeticích oveľa dlhšiu históriu (ČHMÚ 2022b).

Dáta využívané v tejto práci boli získané z Informačného systému kvality ovzdušia (ISKO ČHMÚ) a jedná sa o verifikované dáta v období od 6.9.2013 do 31.12.2020. Dáta za rok 2021 boli v dobe písania tejto práce síce dostupné, ale boli neverifikované, preto neboli použité pre výpočty.

Dostupné dáta zo systému ISKO ČHMÚ predstavujú jednotlivé merania získané v rôznych, vopred stanovených časových intervaloch. Pre lepšiu prehľadnosť a zoznámenie verejnosti so stavom ovzdušia na území ČR vydáva Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) grafickú ročenku pre každý rok, ktorá obsahuje grafické výstupy verifikovaných dát z ISKO ČHMÚ. V čase písania práce bola, z dôvodu prebiehajúcej verifikácie dát za rok 2021, najaktuálnejšia zverejnená ročenka na stránkach ČHMÚ tá za rok 2020. Grafickú ročenku mapujúcu znečistenie ovzdušia v ČR za rok 2020 je možno nájsť na stránkach ČHMÚ (ČHMÚ 2021).



Obr. 1

Národní atmosferická
observatoř Košetice
a atmosférický stožiar,
snímka z dronu

zdroj: CzechGlobe
(<https://www.czechglobe.cz/cs/pracoviste/atmosfericka-stanice-kresin-u-pacova/>)

Metodika spracovania dát

Korelačná analýza dát

Získané neupravené dáta boli v prvom kroku podrobené korelačnej analýze na zistenie miery vzájomnej podobnosti. Do korelácie boli nakombinované merané hladiny v rôznych pároch (tzv. vrstvách), ktoré boli vopred uvažované ako kľúčové pre ďalšiu prácu – konkrétne boli korelačnej analýze podrobené vrstvy 230-50, 230-8, 230-2, 50-8 a 8-2 m. Výsledné hodnoty korelačných koeficientov pre jednotlivé vrstvy sú prezentované v tab. 1.

Tab. 1 Prehľad hodnôt korelačného koeficientu pre jednotlivé korelované vrstvy

Vrstva [m]	Korelačný koeficient	
	Označenie	Hodnota
230-50	r_{230-50}	0,97
230-8	r_{230-8}	0,94
230-2	r_{230-2}	0,89
50-8	r_{50-8}	0,98
8-2	r_{8-2}	0,97

Z hodnôt korelačného koeficientu v tab. 1 možno vidieť, že vrstvy 230-50, 50-8 a 8-2 m majú hodnoty r pomerne blízke číslu 1, ktoré znamená maximálnu možnú koreláciu. Vrstva 230-8 vykazuje v porovnaní s predchádzajúcimi troma vrstvami menšiu hodnotu korelačného koeficientu, čo značí, že pre potreby väčšej presnosti pri práci s jednotlivými vrstvami je lepšie

rozdeliť vrstvu 230-8 na dve vrstvy, a to 230-50 a 50-8. Táto istá skutočnosť platí aj pre vrstvu 230-2, ktorá vykázala najmenšiu hodnotu korelačného koeficientu spomedzi všetkých sledovaných vrstiev, čo znamená, že je lepšie rozdeliť túto vrstvu na vrstvy 230-50, 50-8 a 8-2 m a pracovať s nimi pre získanie presnejších výsledkov.

Spracovanie vstupných dát a výpočet gradientu

Súbor dát získaných z databázy ISKO ČHMÚ bol spracovávaný v programe MS Excel. Tento súbor obsahoval verifikované dáta nameraných denných cO₃ v hladinách 2 m (meranie AIM), 8, 50 a 230 m (meranie atmosférickým stožiarom) nad zemským povrchom, pričom v získanom súbore sa nachádzali dáta od 6.9.2013 do 31.12.2020. V dátach sa viackrát vyskytli výpadky merania, kedy boli merania pre niektoré hladiny krátkodobo alebo sporadicky dlhodobejšie nedostupné. Podrobnejšou analýzou dát bolo zistené, že celkovo šesťkrát za celé sledované obdobie bol v meraniach vynechaný či preskočený celý deň – konkrétne v dátach neboli vôbec obsiahnuté dátumy 2.4.2015, 30.5.2016, 9.5.2018 a 12.+13.+14.5.2018. Tento výpadok celých dní však možno považovať za zanedbateľný, pretože v intervale 7 rokov bolo zistených iba spomínaných šesť chýbajúcich dní.

Po odfiltrovaní neplatných hodnôt bolo prístupné k samotnému výpočtu gradientu. Na jeho výpočet boli vybrané 4 vrstvy, v ktorých bol spočítaný – a to 8-2, 50-8, 230-50 a referenčná 230-8 m. Gradient bol spočítaný za využitia aproximácie prvého rádu:

$$G_{ab} = \frac{c_a - c_b}{x_a - x_b} \cdot 10,$$

(r. 1a)

kde G_{ab} je gradient v zvolenej vrstve; c_a [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] je cO₃ nameraná vo vyššej hladine; c_b [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] je cO₃ nameraná v nižšej hladine; x_a [m] je výška nad povrchom vyššej hladiny; x_b [m] je výška nad povrchom menšej hladiny. Celý vzťah je následne vynásobený číslom 10 z dôvodu malých hodnôt výsledného gradientu. Napríklad, pri výpočte gradientu vo vrstve 230-50 m by zápis aproximácie (r. 1a) mal nasledovný tvar:

$$G_{230-50} = \frac{c_{230} - c_{50}}{230 - 50} \cdot 10$$

(r. 1b)

Využitím (r. 1a) na výpočet gradientu došlo k určitej zmene jednotky, v ktorej je spočítaný gradient uvádzaný. Pôvodná cO₃ bola meraná v $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ale gradient má jednotku $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10$ m, čo

znamená, že uvedená hodnota gradientu vo vybranej vrstve udáva, o koľko sa zvýši CO_2 v danej vrstve každých 10 metrov výšky.

Z dôvodu potreby CO_2 v dvoch hladinách v rovnaký deň na výpočet gradientu v danej vrstve je možné viackrát pozorovať chýbajúcu hodnotu gradientu, pretože nemohol byť spočítaný z dôvodu chýbajúcich dát – najčastejšie sa jednalo o situáciu, kedy chýbala iba jedna koncentrácia v niektorej z hladín, čo znemožnilo samotný výpočet. Všetky bunky obsahujúce neuskutočnený správny výpočet neboli uvažované. Spočítané hodnoty gradientu boli následne rozdelené podľa jednotlivých rokov (v tomto prípade boli dáta brané až od 1.1.2014) a doplnkovo aj podľa jednotlivých zimných a letných období. Zimné obdobie (ZO) trvá od 1.10 do 31.3. nasledujúceho roku a prvým ZO uvádzaným v tejto práci je to na prelome rokov 2013/2014. Letné obdobie (LO) trvá od 1.4. do 30.9. a prvým takýmto obdobím prezentovaným v tejto práci je letné obdobie roku 2014. Aj napriek využitiu nameraných dát z roku 2013 pre potreby prvého ZO, je väčšina grafov v časti *Výsledky* (*obr. 2, 3, 4 a 5* – s výnimkou *obr. 6*) koncipovaná tak, aby grafické znázornenie dát začínalo až 1.1.2014 z dôvodu lepšej prehľadnosti).

Po tomto roztriedení dát boli pre jednotlivé roky a aj obdobia spočítané platné hodnoty, teda koľko hodnôt bolo možné spočítať v porovnaní s maximálnym možným počtom hodnôt v danej vrstve. Výsledky z tohto výpočtu sú uvedené v *Prílohe A3* v časti *A Prílohy*.

Použitie hodnoty gradientu na výpočet CO_2 v hladine bez prístrojového merania

Zmyslom výpočtu gradientu pre jednotlivé vrstvy je to, aby bolo za jeho využitia možné zistiť približnú CO_2 v hladine, v ktorej neprebíha vlastné prístrojové meranie CO_2 . Na základe spracovaných údajov a prezentovaných hodnôt v tejto práci je možné samotný výpočet vykonať v ohraničenom intervale výšky nad povrchom, a to konkrétne medzi 230-2 m. Horné a dolné ohraničenie kopíruje maximálnu a minimálnu hladinu, v ktorej prebiehalo meranie CO_2 .

Pre gradienty v jednotlivých vrstvách boli spočítané ich mediány, a to ako za celý rok, tak aj pre jednotlivé obdobia. Mediány gradientov za celé roky sú vo svojej podstate iba komparatívne pre celkový priebeh, pre samotný výpočet je najlepšie používať mediány gradientov z jednotlivých období, pretože čím menšiu škálu zvolíme, tým je výpočet presnejší. Táto istá skutočnosť sa uplatňuje aj pri výbere správnej vrstvy, pretože zatiaľ čo pre všetky výpočty medzi 2 a 230 m je možné využiť gradient práve vo vrstve 230-2 m, tento postup nie je doporučovaný z dôvodu veľkej škály a tiež väčšej možnej nepresnosti, ktorej dôvody boli popísané v časti o korelačnej analýze dát.

Pri výpočte je potrebné brať na vedomie skutočnosť, že merania prebiehali v hladinách 2, 8, 50 a 230 m a gradienty sú spočítané pre vrstvy 8-2 m, 50-8 m a 230-50 m, pričom v závislosti od výšky nad povrchom, v ktorej je záujem spočítať CO_2 , je nutné zvoliť správnu vrstvu, z ktorej je

možné získať gradient na vlastný výpočet. Napríklad, pri výpočte cO₃ vo výške 6 m je potrebné použiť gradient z vrstvy 8-2 m, pri výpočte cO₃ vo výške 35 m je potrebné počítať s gradientom z vrstvy 50-8 m a pri výpočte cO₃ vo výške 150 m sa volí gradient z vrstvy 230-50 m.

Pre samotný výpočet je ešte dôležité brať do úvahy skutočnosť, že pomocou gradientu sa počíta rozdiel medzi hľadanou hladinou a menšou hladinou vo vrstve – napríklad, ak je potrebné zistiť cO₃ v hladine 80 m nad povrchom, tak za využitia gradientu z vrstvy 230-50 m sa zisťuje nárast cO₃ medzi 50 a 80 m výšky (teda nárast za 30 m), ktorý sa následne pripočíta ku prístrojovo meranej cO₃ v hladine 50 m. Celý popísaný proces možno obísť za využitia nasledujúceho vzťahu:

$$c_x = c_b + G_{ab} \cdot \frac{(x - x_b)}{10},$$

(r. 2a)

kde c_x je hľadaná koncentrácia v uvažovanej hladine; c_b je koncentrácia v nižšej hladine z používanej vrstvy; G_{ab} je hodnota gradientu vo vrstve a-b; x je výška nad povrchom, v ktorej je zisťovaná koncentrácia; x_b je nižšia hladina z využívanej vrstvy. Rozdiel výšok nad povrchom ($x - x_b$) je na záver delený číslom 10 z dôvodu toho, že hodnota gradientu je vypočítaná na 10 m prírastok výšky.

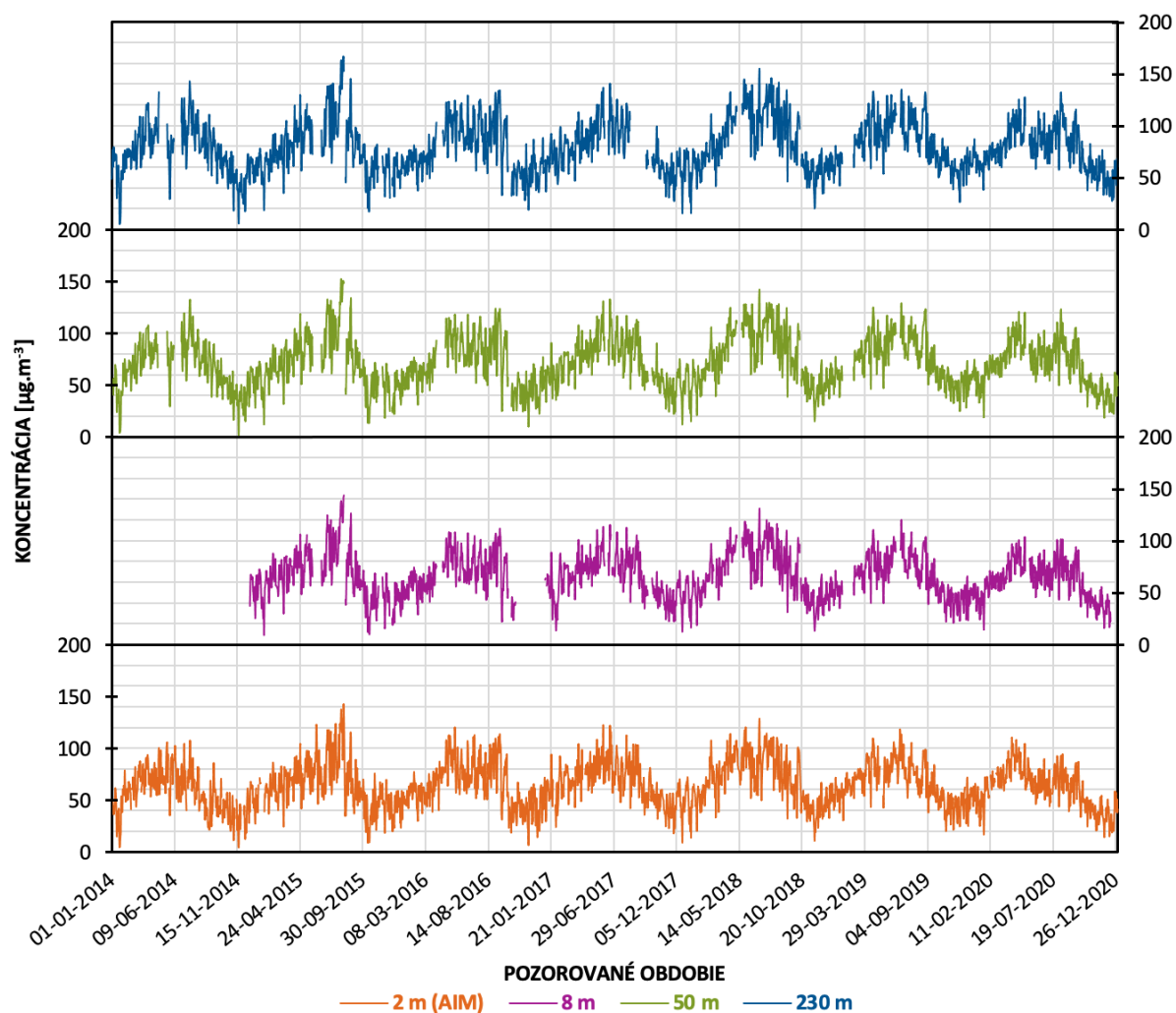
Napríklad, ak by bolo potrebné spočítať cO₃ vo výške 110 m nad povrchom, kde neprebíha meranie, tak prvým krokom je výber správnej vrstvy – v tomto prípade sa jedná o vrstvu 230-50 m. Po výbere vhodnej vrstvy a zistení hodnoty gradientu v tejto vrstve je nasledujúcim krokom dosadenie do (r. 2a) a samotný výpočet:

$$c_{110} = c_{50} + G_{230-50} \cdot \frac{(110 - 50)}{10}$$

(r. 2b)

Výsledky

V tejto časti sú prezentované získané výstupy spolu s grafickým zobrazením denných koncentrácií v hladinách 8, 50 a 230 m, ktoré sú doplnené o grafické vyobrazenie priebehu gradientu v 4 sledovaných vrstvách. Získané celkové mediány gradientov za celý rok a za jednotlivé zimné a letné obdobia sú tiež prezentované vo forme grafov na obr. 2-6 na nasledujúcich stranách.



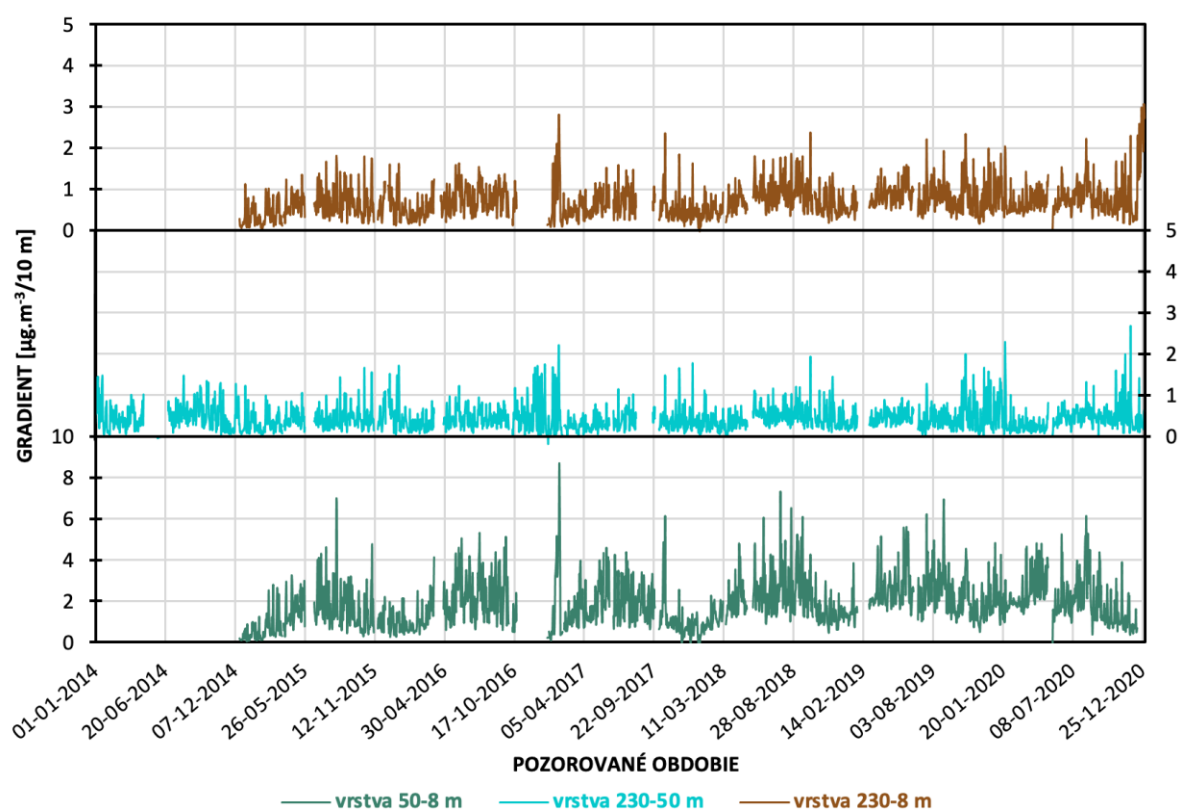
Obr. 2 Grafické znázornenie priebehu cO₃ v hladinách 2, 8, 50 a 230 m nad zemským povrchom v medziročnom porovnaní

Podľa pozorovaní vyplývajúcich z grafického znázornenia dát na obr. 2 vyplýva, že cO₃ vykazujú každoročne zrovnateľný chod, pričom možno všeobecne poukázať na dva trendy, ktoré sa pravidelne opakujú. Prvým trendom je trend stúpajúci, kedy v tomto období (zvyčajne počas jarných mesiacov) cO₃ začínajú v ovzduší stúpať a tento nárast pokračuje väčšinou až do letných mesiacov, kedy je možné pozorovať maximá cO₃ v meraných hladinách nad zemským povrchom. V maxime dochádza k zlomu a cO₃ začínajú pozvoľna klesať, čo indikuje príchod druhého trendu, a to klesajúceho – ten nastupuje najmä počas jesenných mesiacov (niekedy už koncom leta) a za jeho vrchol možno považovať minimá cO₃, ktoré v sledovaných hladinách možno namerať v zimných mesiacoch, obyčajne v okolí mesiaca január.

Ročný priebeh nameraných koncentrácií v jednotlivých výškach nad zemským povrchom je zhodný svojou periodicitou naprieč celým stĺpcom vzduchu, zásadným rozdielom ale zostáva hodnota koncentrácií v závislosti na výškovom stupni. Vo všeobecnosti platí, že cO₃ so stúpajúcou

výškou nad zemským povrchom tiež rastie. Možno teda povedať, že koncentrácie namerané v 230 m budú vyššie, ako tie, ktoré by boli namerané vo výške napríklad 8 m nad zemou.

V grafických znázorneniach sa vyskytujú sporadicky prázdne miesta, ktoré znamenajú výpadok merania v danom období. Absencia merania, ktorá má za následok chýbajúce dáta, bola najčastejšie spôsobená kalibráciami alebo vplyvom porúch na prístrojoch (Lhotka et al. 2020). Najväčší výpadok dát je pozorovateľný pri meraní v hladine 8 m nad povrchom, a to v období na prelome rokov 2016-2017, práve v čase, kedy bývajú každoročne pozorované minimá CO_2 . Tento výpadok je však možné do určitej miery priblížiť dátami CO_2 nameranej v 2 m nad povrchom (AIM meranie), ktoré by malo poskytovať veľmi podobné hodnoty a priebeh, ako meranie v ôsmich výškových stupňoch.



Obr. 3 Grafické znázornenie priebehu gradientu CO_2 vo vrstvách 50-8, 230-50 a 230-8 m nad zemským povrchom v medzoročnom porovnaní (škála pri vrstve 50-8 m má vyššie hodnoty v porovnaní s ostatnými vrstvami)

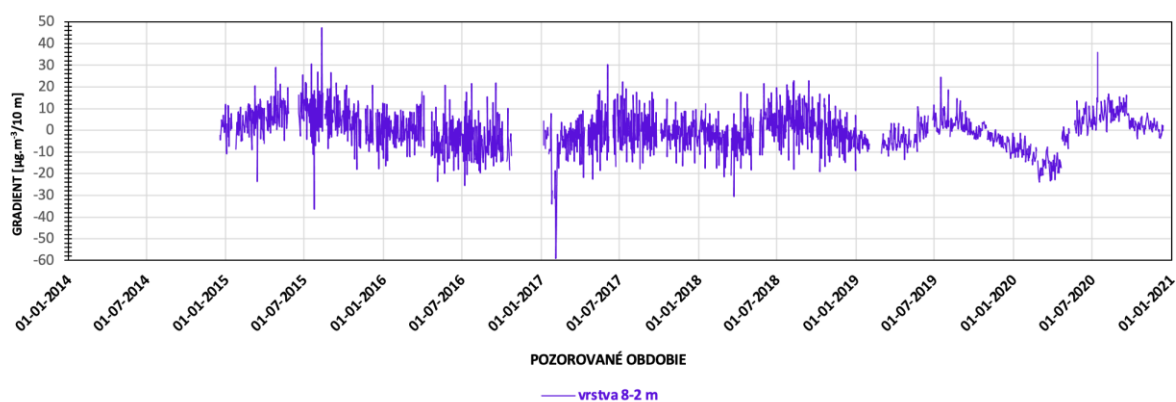
Grafické znázornenie hodnôt gradientu CO_2 v sledovanom období na obr. 3 nevykazuje takú jednoznačnú periodicitu, akú bolo možno sledovať pri priebehu koncentrácie v jednotlivých hladinách na obr. 2. Na prvý pohľad možno pozorovať značnú odlišnosť medzi jednotlivými vrstvami, pričom vo vrstve 50-8 m je dobre viditeľné slabé kolísanie gradientu, čo vykazuje

podobnosť s priebehom CO_2 . Najvyššie hodnoty gradientu v tejto vrstve sú zhodne pozorované s výskytom najvyšších hodnôt CO_2 v priebehu roka.

Veľmi podobný priebeh vykazuje aj grafické znázornenie priebehu hodnoty gradientu vo vrstve 230-8 m, kde priebeh gradientu s jeho maximami a minimami kopíruje vrstvu 50-8 m, i keď s oveľa menším kolísaním. V čom sa však tieto vrstvy významne od seba líšia je práve hodnota gradientu, kde hodnoty v hladine 230-8 m sú približne 3-krát menšie v porovnaní s hodnotami v hladine 50-8 m. V roku 2020 bol taktiež pozorovaný rozdielny priebeh gradientu v období jeho obvyklých miním, pričom po takmer celý rok dosahoval zrovnateľné hodnoty. Rok 2020 bol však rokom, kedy vypukla naplno pandémia covid-19, prinášajúca vlnu lockdown-ov a lokálnych obmedzení, ktoré mohli mať na uvedenú skutočnosť určitý vplyv.

Ako pomerne celoročne stagnujúci (najmä v porovnaní s predchádzajúcimi vrstvami) pôsobí priebeh gradientu vo vrstve 230-50 m, ktorý si celoročne drží približne rovnako nízke hodnoty s lokálnymi maximami v jesenných až zimných mesiacoch – jeho priebeh je teda v nesúlade s priebehom gradientu najmä vo vrstve 50-8 m. Pri porovnaní hodnôt gradientu v tejto vrstve (230-50 m) najmä s vrstvou 50-8 m možno sledovať, že tieto hodnoty sú značne menšie, z čoho vyplýva, že hlavný nárast CO_2 v troposfére sa odohráva pomerne blízko zemskému povrchu (vo vrstve 50-8 m).

V grafických znázorneniach priebehu gradientu vo vrstvách 50-8 a 230-8 m je jedno významnejšie obdobie, v ktorom z dôvodu výpadku meraní chýbajú dáta. Toto obdobie sa nachádza v okolí mesiaca apríl v roku 2017, čo je doba, v ktorej hodnoty gradientu v týchto vrstvách dosahovali najnižšie hodnoty a z dôvodu nepodobnosti priebehu gradientu vo vrstve 230-50 m nemožno tieto hodnoty približne určiť práve z tejto vrstvy, ktorá má dané obdobie pokryté. Najmä z tohto dôvodu je teda možné tento výpadok dát považovať za významnejší.



Obr. 4

Grafické znázornenie priebehu gradientu CO_2 vo vrstve 8-2 m nad zemským povrchom v medziročnom porovnaní

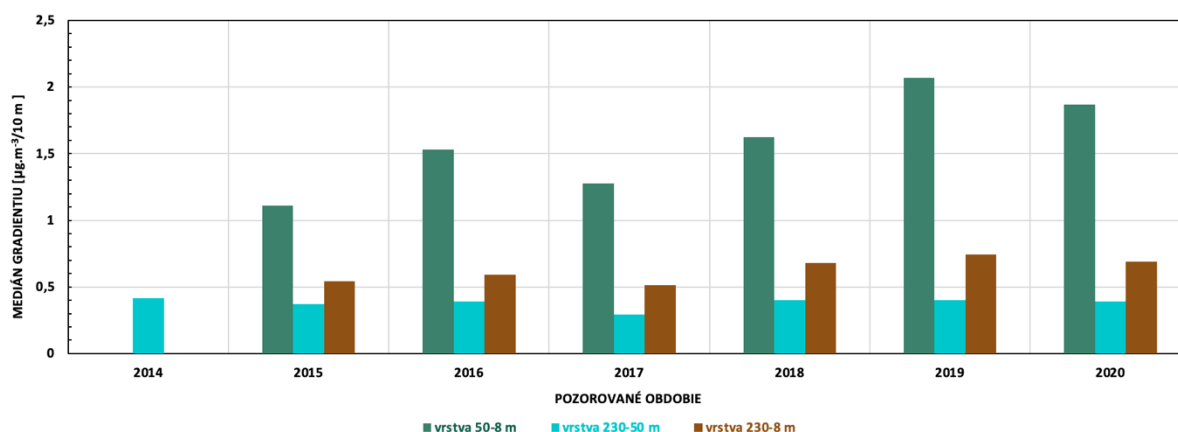
V popise k predchádzajúcemu *obr. 3* bolo uvedené, že na základe hodnôt gradientu vo vrstve 50-8 m v porovnaní s ostatnými vrstvami (230-50 a 230-8 m) je hodnota gradientu v tejto vrstve (50-8 m) najvyššia, čo znamená, že nárast CO_2 je v tejto vrstve najväčší. Z dôvodu dostupnosti dát z meraní CO_2 vo výške 2 m nad zemským povrchom (pomocou AIM-u) bolo rozhodnuté o spočítaní gradientu tiež pre vrstvu 8-2 m. Hodnoty tohto gradientu, ktorý zobrazuje zmenu CO_2 v $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ na 10 m výšky ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10 \text{ m}$) sú graficky znázornené na *obr. 4*, ktorý je uvádzaný samostatne mimo *obr. 3*, najmä z dôvodu veľmi veľkého rozsahu hodnôt gradientu, ktorý osciluje okolo nuly do kladných i záporných, pomerne vysokých hodnôt. Grafické znázornenie hodnôt gradientu O_3 vo vrstve 8-2 m na *obr. 4* vynesene celkovo z 1904 hodnôt, z ktorých 941 bolo kladných (CO_2 so stúpajúcou výškou rastie) a 963 záporných (CO_2 so stúpajúcou výškou klesá).

Či už v prípade kladných alebo záporných cifier, tieto hodnoty gradientu v tejto vrstve sú signifikantne vyššie v porovnaní s hodnotami gradientu vo vrstve 50-8 m, ktorá bola v predchádzajúcich odstavcoch označená ako hlavná vrstva nárastu CO_2 . Z týchto informácií o vrstve 8-2 m však vyplýva, že ešte oveľa väčšie zmeny sa dejú pod 8 výškovými metrami, veľmi blízko nad zemským povrchom.

Z grafického znázornenia môžeme vyvodiť, že hodnoty gradientu sú v tomto prípade kladné i záporné. Kladné hodnoty gradientu boli získané v prípade, že nameraná CO_2 vo výške 8 m nad povrchom bola vyššia ako tá v dvoch výškových metroch. Pokiaľ však bola koncentrácia v ôsmich výškových metroch nižšia ako tá, ktorá bola nameraná nad zemským povrchom vo výške 2 m, tak hodnota gradientu bola záporná a indikuje, akým tempom koncentrácia klesá.

Z pohľadu periodicity gradientu vo vrstve 8-2 m nie je situácia úplne jednoznačná. Z grafického znázornenia možno pozorovať akýsi vzor priebehu hodnôt gradientu, s maximami v okolí jesenného obdobia (najmä október až december) a minimami v jarných a letných mesiacoch (najmä apríl až júl), avšak tento priebeh je pomerne ťažko definovateľný, pretože vykazuje značnú variabilitu. Odklon od bežného priebehu v tejto vrstve predstavuje rok 2020, kedy hodnota gradientu pozvoľna klesala v priebehu celého roka až približne po mesiac október-november, kde dosiahla minimum a následne začala opäť stúpať – tento priebeh je inverzný v porovnaní s bežným priebehom gradientu v tejto vrstve. Keďže je táto vrstva tesne nad zemským povrchom, tak je najviac ovplyvnená antropogénnym faktorom, z čoho vyplýva, že dôvodom tejto anomálie mohli byť obmedzenia súvisiace s pandémiou covid-19, ktorá so sebou priniesla sériu obmedzení súvisiacich s obmedzením pohybu, dopravy a ľudskej činnosti.

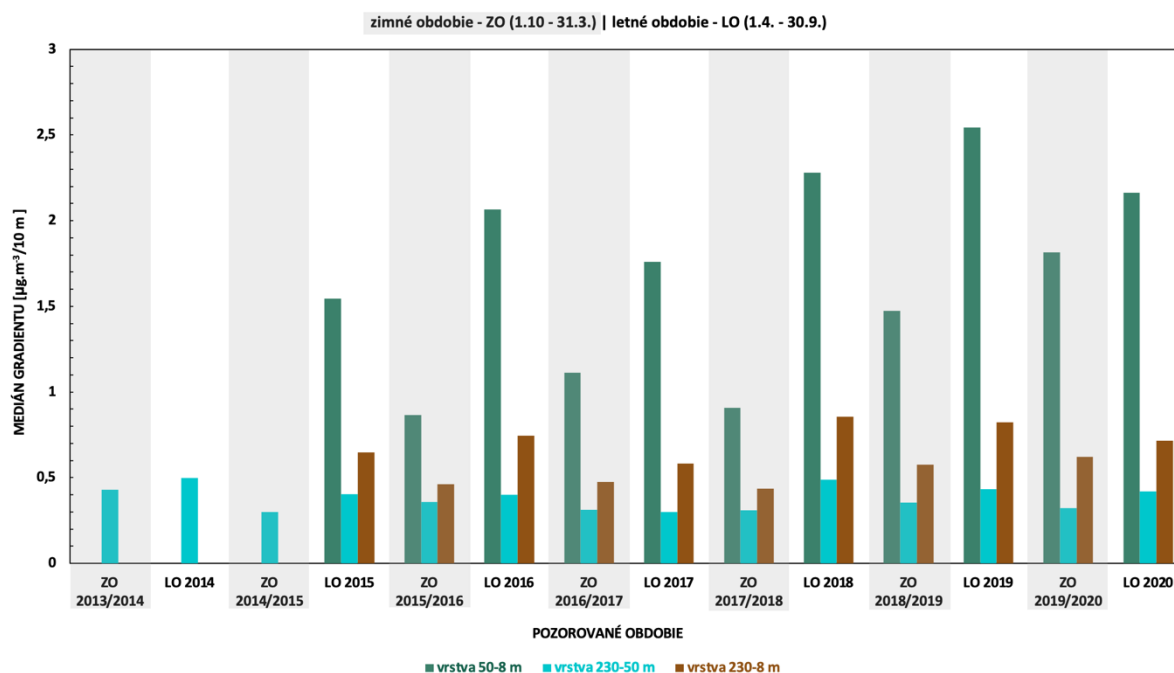
Chýbajúce dáta v období okolo mesiaca apríl 2017 súvisia s chýbajúcimi dátami CO_2 vo výške 8 m nad zemou, následkom čoho nebolo možné pre toto obdobie spočítať gradient.



Obr. 5 Grafické znázornenie priebehu mediánov gradientu CO_2 vo vrstvách 50-8, 230-50 a 230-8 m nad zemským povrchom v medziročnom porovnaní (číselné hodnoty gradientu z *obr. 5* sú uvedené v časti A Prílohy ako *Príloha A1*)

Na *obr. 3* je uvedené grafické znázornenie priebehu hodnôt gradientu CO_2 počas pozorovaného obdobia v jednotlivých rokoch. Pre lepšiu predstavu rastu či prípadného poklesu hodnôt gradientu slúži grafické znázornenie na *obr. 5*, ktoré zobrazuje ročný medián hodnôt gradientu CO_2 v jednotlivých vrstvách vo vzájomnom porovnaní s jednotlivými rokmi. Z tohto zobrazenia možno usudzovať, že hodnota gradientu sa vo vrstve 230-50 m mení v pozorovanom období minimálne (hodnoty gradientu sa nachádzajú v rozmedzí **0,29-0,41** $\mu\text{g.m}^{-3}/10 \text{ m}$) a súčasne hodnoty gradientu v tejto vrstve dosahujú v porovnaní s vrstvami 230-8 a 50-8 m najmenšie hodnoty. Mierne kolísanie hodnôt v medziročnom porovnaní bolo zaznamenané vo vrstve 230-8 m (hodnoty v rozmedzí **0,51-0,74** $\mu\text{g.m}^{-3}/10 \text{ m}$), pričom v tejto vrstve je uvažovaný celý vertikálny stĺpec vzduchu meraný stožiarom. Najmä pri porovnaní vrstvy 230-8 m s vrstvou 230-50 m možno predpokladať, že vyššia hodnota gradientu vo vrstve 230-8 m je spôsobená práve uvažovaním nameraných koncentrácií pod 50 výškovými metrami.

Najväčšiu variabilitu vykazuje priebeh hodnôt gradientu vo vrstve 50-8 m, ktorého hodnoty sú tiež najvyššie spomedzi všetkých zobrazených vrstiev a nachádzajú sa v rozmedzí **1,11-2,07** $\mu\text{g.m}^{-3}/10 \text{ m}$. Od roku 2017 do roku 2019 bol vo vrstve 50-8 m pozorovaný sústavný rast hodnôt gradientu, ktorý bol prerušený znížením tejto ročnej hodnoty v roku 2020.



Obr. 6 Grafické znázornenie priebehu mediánov gradientu CO_3 vo vrstvách 50-8, 230-50 a 230-8 m nad zemským povrchom v letnom a zimnom období v medziročnom porovnaní (číselné hodnoty gradientu z *obr. 6* sú uvedené v časti A Prílohy ako *Príloha A2*)

Na *obr. 6* sa nachádza grafické znázornenie priebehu hodnôt gradientu CO_3 v 3 vrstvách v zimných a letných obdobiach v priebehu pozorovaných rokov. LO je vždy špecifické pre daný rok, pretože jeho trvanie je od prvého aprílového dňa a končí sa posledným septembrovým dňom. ZO sa vyskytuje vždy v dvoch rokoch, pretože sa nachádza na ich vzájomnom prechode – začína sa vždy prvým októbrovým dňom a jeho koniec indikuje 31. marec nasledujúceho roku. Na *obr. 5* je možné vidieť medián gradientu pre jednotlivé vrstvy v jednotlivých pozorovaných rokoch, ale *obr. 6* poskytuje oveľa detailnejší pohľad na priebeh hodnôt gradientu v jednotlivých obdobiach, pretože rozlišuje letné a zimné obdobie, ktoré sa, ako už bolo spomínané, od seba v otázke CO_3 v ovzduší značne odlišujú. V grafe na *obr. 6* sú opäť uvádzané mediány za jednotlivé obdobia, pričom si je možné všimnúť odlišné hodnoty, čo znamená, že mediány za celý rok uvádzané v grafickom znázornení na *obr. 5* by mali byť brané prakticky iba orientačne.

Pri skúmaní priebehu hodnôt gradientu v jednotlivých vrstvách na *obr. 6* je možné pozorovať skutočnosť, že priebeh gradientu vo vrstve 230-50 m je v jednotlivých obdobiach medziročne pomerne stabilný a pohybuje sa v rozmedzí $0,30\text{-}0,43 \mu\text{g.m}^{-3}/10 \text{ m}$ počas ZO a v rozmedzí $0,30\text{-}0,50 \mu\text{g.m}^{-3}/10 \text{ m}$ počas LO. Pre priebeh gradientu vo vrstve 230-8 m je možné pozorovať mierne kolísanie medzi obdobiami, kedy v LO je hodnota gradientu spravidla vyššia a v ZO klesá na nižšie hodnoty ($0,44\text{-}0,62 \mu\text{g.m}^{-3}/10 \text{ m}$). Hodnoty gradientu vo vrstve 230-8 m v LO sú bez významnejších výkyvov a zvyčajne sa pohybujú v rozmedzí $0,58\text{-}0,86 \mu\text{g.m}^{-3}/10 \text{ m}$. Kontrastne s letnými, pomerne stabilnými hodnotami gradientu vo vrstve 230-8 m, je možné pozorovať od ZO

2018/2019 postupný každoročný nárast v hodnote gradientu v ZO – tento nárast oproti ZO 2019/2020 bol pozorovaný aj v ZO 2019/2020 – toto ZO by nemalo byť významne ovplyvnené pandémiou covid-19 a reštrikciami s ňou súvisiacimi, pretože tie vstúpili do platnosti v Českej republike až okolo 12. marca 2020, pričom ZO 2019/2020 sa končilo 31.3.2020.

Posledná vrstva 50-8 m v grafickom znázornení na obr. 6 jasne dominuje najvyššími hodnotami gradientu CO_2 v porovnaní so zvyšnými dvoma. V tejto vrstve možno pozorovať vyššie hodnoty každoročne v LO (rozmedzie **1,55-2,54** $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$) a nižšie hodnoty v ZO (rozmedzie **0,87-1,82** $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$). Od LO 2015 bol v medziročnom pozorovaní determinovaný nárast gradientu až do LO roku 2019, kedy presiahol hodnotu 2,5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$. V LO 2020 v medziročnom porovnaní klesla hodnota gradientu pod úroveň z LO 2018, čo bolo ale pravdepodobne spôsobené obmedzeniami súvisiacimi s pandémiou covid-19, najmä s obmedzením pohybu, ktorý mal za následok pokles intenzity dopravy a s tým súvisiaci nižší obsah plynov NO_x v ovzduší.

Vo vrstve 50-8 m je možné pozorovať zaujímavý trend v zimných obdobiach, kedy od ZO 2017/2018 je zreteľný každoročný nárast hodnoty gradientu v tejto vrstve, pričom jeho hodnoty v ZO 2019/2020 boli doposiaľ najviac priblížené hodnotám gradientu LO 2019. Táto hodnota gradientu sledovaná vo vrstve 50-8 m v ZO 2019/2020 bola ešte bližšie hodnote gradientu v LO 2020 – letné obdobie tohto roku bolo ale pravdepodobne ovplyvnené pandémiou covid-19 a s ňou súvisiacimi obmedzeniami.

5 Diskusia

Cieľové denné hodnoty cO_3 z meraní v 4 rôznych výškových hladinách v areáli NAOK boli po spracovaní a grafickom vyobrazení porovnané s dostupnými zdrojmi, ktoré poukázali na podobnosti i prípadné rozdiely. Hodnoty spracovávané v tejto práci boli získané za obdobie od 6.9.2013 – 31.12.2020.

Z dát vyplýva, že cO_3 vykazujú každoročne zrovnateľný chod, kedy ich hodnoty stúpajú v jarných mesiacoch, maximum dosahujú v letných mesiacoch a ich pokles je možné pozorovať počas jesenných mesiacov s minimom v zimných mesiacoch. Najvyššie imisné cO_3 boli pravidelne pozorované v najvyššej hladine merania – v 230 m. Všetky tieto zistenia sú v súlade s pozorovaniami vykonávanými v NAOK v sledovanom období 1.1.2014 – 31.12.2018 (Lhotka et al. 2020). Zároveň však dáta poukazujú na jeden rozdiel medzi výstupmi zistenými v tejto práci a pozorovaniami v NAOK (Lhotka et al. 2020), konkrétne v zmene cO_3 medzi 2 a 8 m. Výstup z pozorovania v NAOK poskytuje informáciu o významne vyššej cO_3 v hladine 8 m v porovnaní s hladinou 2 m, zatiaľ čo spočítaný gradient pre vrstvu 8-2 m v tejto práci obsahuje celkom 1904 hodnôt, z čoho 941 z nich je kladných a 963 záporných – záporná hodnota gradientu znamená nižšiu hodnotu cO_3 v hladine 8 m v porovnaní s hladinou 2 m. Tento rozdiel je s veľkou pravdepodobnosťou spôsobený väčším objemom dát spracovávaným v tejto práci, kedy boli vyhodnocované aj dáta za obdobie od 1.1.2019 – 31.12.2020, v ktorom mohli nastať zmeny v trende priebehu cO_3 . Pri pohľade na spočítané hodnoty gradientu pre vrstvu 8-2 m v tabuľke *A2* v časti *A Prílohy*, je možné pozorovať mediány hodnôt gradientu za jednotlivé obdobia, z ktorých viac ako polovica je záporná, čo môže indikovať väčšiu variabilitu záporných hodnôt, ktorá následne ovplyvnila medián za dané obdobie.

Pre nedostatok zdrojov k hodnotám gradientu v jednotlivých vrstvách bola ako porovnávacíu vlastnosť vybraná zmena distribúcie O_3 vo vertikále, pričom mimo variabilnej prvej vrstvy 8-2 m bol celkový trend cO_3 so stúpajúcou výškou rastúci, kedy bolo možné pozorovať najvyššie cO_3 v najvyššej hladine 230 m. Tento priebeh súhlasí s vertikálnymi profilmi, ktoré sú popísané v literatúre aj v rôznych štúdiách, v ktorých prebiehalo meranie cO_3 vo vertikále, napríklad nasledujúce (Chi et al. 2018, Geyer 2004, Krzyzanowski 2004).

Chod cO_3 za sledované obdobie vykazuje tiež zaujímavý fenomén, kedy sa obdobia s vysokými koncentráciami postupne predlžujú a maximá nie sú také ostré a jasné, ale v grafoch vykazujú väčšiu plochu zaberajúcu dlhšie časové obdobie – tieto zistenia boli popísané v práci

(Hůnová et al. 2020). Ako sa ďalej v článku uvádza, tento trend môže byť následkom klimatickej zmeny a stále sa zvyšujúcej globálnej teploty.

Vypočítané hodnoty gradientu pre jednotlivé vrstvy vykazovali mnohé, pomerne dobre definovateľné trendy, s výnimkou roku 2020, ktorý bol špecifický poklesom hodnôt gradientu naprieč všetkými sledovanými vrstvami, pričom najvýraznejšie rozdiely boli pozorované vo vrstvách 50-8 m a 8-2 m, ktoré sú najbližšie zemskému povrchu s mnohými zdrojmi emisií. Príčinou tohto poklesu je s veľkou pravdepodobnosťou pandémie covid-19 a s ňou súvisiace mnohé karanténne opatrenia, ktoré zásadným spôsobom znížili mobilitu a intenzitu dopravy, ktorá je zdrojom emisií VOC a NO_x, predstavujúcich prekurzory vzniku O₃. Táto súvislosť bola potvrdená aj Európskou agentúrou pre životné prostredie (EEA 2022), ktorá ďalej uvádza, že v roku 2020 bol zaznamenaný pokles emisií NO₂ na monitorovaných staniciach až o 70 %.

6 Záver

Prvotné spracovanie získaných hodnôt cO₃, pochádzajúcich z meraní v 4 výškových hladinách (2, 8, 50 a 230 m) v NAOK, poukázalo na jasnú periodicitu v chode koncentrácií v priebehu roka, kedy najvyššie namerané koncentrácie bolo možné pozorovať v LO (1.4.-30.9.) a najnižšie v ZO (1.10.-31.3.), pričom všeobecne platí, že najvyššie hodnoty boli zaznamenané vo výške 230 m v oboch obdobiach, čo znamená, že cO₃ s výškou stúpa.

Pri výpočte hodnôt gradientu cO₃ vo vrstvách 230-50, 50-8, 8-2 a 230-8 m za využitia aproximácie I. rádu boli zistené nasledujúce poznatky:

A. **Vrstva 230-50 m** vykazovala medziročne pomernú stabilitu gradientu so stagnujúcim trendom a lokálnymi maximami počas jesenných až zimných mesiacov. Mediány gradientu sa pohybovali v rozmedziach (uvedené v [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$]):

0,29-0,41 za celý rok; **0,30-0,43** v ZO; **0,30-0,50** v LO

B. **Vrstva 50-8 m** vykazovala každoročne slabé kolísanie gradientu s maximami v LO a minimami v zimných mesiacoch, pričom bolo od roku 2017 možné pozorovať postupný medziročný nárast hodnoty gradientu až do roku 2020, kedy jeho hodnota poklesla. V sezónnom chode bolo v LO možné pozorovať všeobecne vyššie hodnoty gradientu, ktoré medziročne od LO 2015 postupne rástli, pričom zlom prišiel v LO 2020, kedy sa hodnota gradientu prepadla pod úroveň z LO 2018. Spravidla nižšie hodnoty gradientu v ZO v tejto vrstve zaznamenali od ZO 2017/2018 každoročný postupný nárast, kedy sa ich hodnoty začali pomaly približovať tým, ktoré boli

namerané v letných obdobiach v tejto vrstve. Mediány gradientu sa pohybovali v rozmedziach (uvedené v [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$]):

1,11-2,07 za celý rok; **0,87-1,82** v ZO; **1,55-2,54** v LO

C. **Vrstva 8-2 m** vykazovala najväčšiu variabilitu gradientu spomedzi všetkých sledovaných vrstiev, pričom hodnoty gradientu boli vysoké a takmer rovnomerne distribuované do kladných i záporných hodnôt, čo značilo nárast alebo pokles koncentrácie ozónu medzi 2 a 8 m. V roku 2020 bol v tejto vrstve zaznamenaný sústavný pokles cO_3 až po jesenné mesiace. Táto vrstva, pre jej blízkosť zemskému povrchu, je najviac ovplyvnená antropogénnym znečistením. Mediány gradientu sa pohybovali v rozmedziach (uvedené v [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$]):

-3,41-5,47 za celý rok; **-7,73-0,82** v ZO; **-4,67-7,62** v LO

D. **Vrstva 230-8 m** vykazovala veľmi slabú mieru kolísania gradientu, kopírujúcu vrstvu 50-8 m (hodnoty boli ale približne 3-krát menšie), s pravidelne vyššími hodnotami v LO a nižšími hodnotami v ZO, pričom je možné od ZO 2018/2019 pozorovať postupný medziročný nárast hodnôt gradientu v tejto vrstve. Mediány gradientu sa pohybovali v rozmedziach (uvedené v [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}/10\text{ m}$]):

0,51-0,74 za celý rok; **0,44-0,62** v ZO; **0,58-0,86** v LO

Prepady hodnôt gradientu a cO_3 v roku 2020 mali pravdepodobne súvislosť s rozšírením pandémie covid-19, ktorá zaviedla karanténne opatrenia, zníženie mobility a dopravnej záťaže, čo viedlo k zníženiu emisií z dopravy, ktoré predstavujú prekurzory vzniku O_3 .

Cez spočítané a v práci uvedené hodnoty gradientu pre jednotlivé vrstvy, ich analýzou a interpretáciou, sa podarilo zistiť, že zmena cO_3 vo vertikálnom profile nie je rovnomerná, čo podporujú pomerne odlišné hodnoty gradientu spočítané pre jednotlivé vrstvy – to znamená, že nárast cO_3 vo vertikále prebieha inou mierou v každej sledovanej vrstve. Týmto zistením sa podarilo potvrdiť prvú hypotézu, ktorá bola pre túto prácu vyslovená.

Z grafov a samotných výpočtov gradientu v práci vyplýva, že cO_3 je variabilná a líši sa v ZO (nižšie hodnoty gradientu značiace pomalejší nárast, nižšie cO_3) a LO (vyššie hodnoty gradientu reflektujúce rýchlejší nárast, vyššie cO_3). Takáto heterogenita v hodnotách gradientu implikuje, že zmena cO_3 vo vertikále sa mení rozdielne v LO a ZO, čím bola potvrdená aj druhá vyslovená hypotéza.

Z dát bolo možné taktiež vidieť rozdielne namerané cO_3 v jednotlivých hladinách, ktoré boli doplnené o odlišné hodnoty gradientu pre jednotlivé vrstvy – oba tieto argumenty významne podporujú tretiu vyslovenú hypotézu, ktorá tvrdila, že hodnota cO_3 nameraná

v hladine 2 m nad povrchom nie je plne vypovedajúca pre vyššie hladiny, ktorá bola týmto potvrdená.

Ako ukázali výstupy zo spracovaných dát cO_3 z NAOK, distribúcia O_3 sa vo vertikále mení, konkrétne s výškou rastie, vykazuje sezónnu periodicitu v priebehu roku a jeho koncentrácie majú medziročne stúpajúci trend. Hodnoty O_3 majú počas letných období vyššie celkové koncentrácie v porovnaní so zimnými obdobiami, kedy sú hodnoty koncentrácie nižšie – táto skutočnosť indukuje rozdielnu dynamiku cO_3 v týchto obdobiach. Pre veľkú variabilitu cO_3 vertikále a gradientu je možné usúdiť, že merania AIM vo výške 2 m nad povrchom nemajú dostatočnú reprezentáciu pre vyššie hladiny, čo naznačuje, že pre štúdium procesov alebo expozície receptorov vo vyšších hladinách nad povrchom nie je vhodné uvažovať tieto hodnoty z meraní AIM z dôvodu možnej nepresnosti.

Zoznam použitej literatúry

- ACTRIS. 2022a. Observatoř Košetice - Základní informace . <https://www.actris-ri.cz/cs/menu/naok/observator-kosetice/>.
- ACTRIS. 2022b. Observatoř Košetice - Mezinárodní spolupráce. <https://www.actris-ri.cz/cs/menu/naok/observator-kosetice/mezinarodni-spoluprace/>.
- ACTRIS. 2022c. Observatoř Košetice - Atmosférický stožár. <https://www.actris-ri.cz/cs/menu/naok/atmosfericky-stozar/>.
- ACTRIS. 2022d. Atmosférický stožár Košetice - přístrojové vybavení. <https://www.actris-ri.cz/cs/menu/naok/atmosfericky-stozar/pristrojove-vybaveni/>.
- Braniš, M., I. Hůnová, A. Bartoňová, J. Bednář, V. Bízek, J. Brechler, V. Cílek, J. Fiala, J. Filip, I. Holoubek, J. Hovorka, J. Kalvová, J. Mikšovský, B. Moldan, J. Moldanová, R. Přibil, and A. Raidl. 2009. Atmosféra a klima. Aktuální otázky ochrany ovzduší. First edition. Nakladatelství Karolinum, Praha.
- Chi, X., C. Liu, Z. Xie, G. Fan, Y. Wang, P. He, S. Fan, Q. Hong, Z. Wang, X. Yu, F. Yue, J. Duan, P. Zhang, and J. Liu. 2018. Observations of ozone vertical profiles and corresponding precursors in the low troposphere in Beijing, China. *Atmospheric Research* 213:224–235.
- ČHMÚ. 2021. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2020. 1. ČHMÚ, Praha .
- ČHMÚ. 2022. Informace o kvalitě ovzduší v ČR Seznam lokalit, kde se měří znečištění ovzduší. https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/loc_JKOS_CZ.html.
- ČHMÚ. 2022a. Observatoř Košetice. <https://www.chmi.cz/o-nas/organizacni-struktura/usek-kvality-ovzdusi/oddeleni-observator-Kosetice/zakladni-informace>.
- ČHMÚ. 2022b. ČHMÚ JKOSA. https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/mp_JKOSA_CZ.html.
- EEA. 2021a. Air quality in Europe 2021. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021>.
- EEA. 2021b. Výrazné zlepšení kvality ovzduší v Evropě za posledních deset let, méně úmrtí spojených se znečištěním. <https://www.eea.europa.eu/cs/highlights/vyrazne-zlepseni-kvality-ovzdusi-v>.
- EEA. 2022. Europe's air quality status 2022. <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022>.
- Esterlová, J. 2018. Dynamika distribuce částic atmosférického aerosolu v mezní vrstvě atmosféry. Diplomová práce (Mgr.). Univerzita Karlova, Praha.
- Fowler, D., P. Brimblecombe, J. Burrows, M.R. Heal, P. Grennfelt, D.S. Stevenson, A. Jowett, E. Nemitz, M. Coyle, X. Liu, Y. Chang, G.W. Fuller, M.A. Sutton, Z. Klimont, M.H. Unsworth, and M. Vieno. 2020. A chronology of global air quality. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 378:20190314.
- Geyer, A. 2004. Vertical profiles of NO₃, N₂O₅, O₃, and NO_x in the nocturnal boundary layer: 2. Model studies on the altitude dependence of composition and chemistry. *Journal of Geophysical Research* 109:D12307.
- Hovorka, J., C. Leoni, V. Dočekalová, J. Ondráček, and N. Zíková. 2016. Aerosol Distribution in The Planetary Boundary Layer Aloft a Residential Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 44:052017.
- Hůnová, I. 2018. Přízemní ozon. *Chemické listy* 112:598–604.

- Hůnová, I., M. Brabec, and M. Malý. 2019. What Are the Principal Factors Affecting Ambient Ozone Concentrations in Czech Mountain Forests? *Frontiers in Forests and Global Change* 2.
- Hůnová, I., M. Brabec, and M. Malý. 2020. Trends in ambient O₃ concentrations at twelve sites in the Czech Republic over the past three decades: Close inspection of development. *Science of The Total Environment* 746:141038.
- Hůnová, I., and S. Janoušková. 2004. Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší. First edition. Nakladatelství Karolinum, Praha.
- Karlsson, P.E., M. Hansson, H.-O. Höglund, and H. Pleijel. 2006. Ozone concentration gradients and wind conditions in Norway spruce (*Picea abies*) forests in Sweden. *Atmospheric Environment* 40:1610–1618.
- Kočová, I., A. Feriancová, Š. Běláková, and K. Čiháková. 2005. Ozón - škodí nebo chrání? Sdružení TEREZA, Praha.
- Krzyzanowski, J. 2004. Ozone variation with height in a forest canopy—results from a passive sampling field campaign. *Atmospheric Environment* 38:5957–5962.
- Lhotka, R., I. Hůnová, M. Váňa, K. Komínková, and I. Holoubek. 2020. Vertikální distribuce přízemního ozonu ze stožárového měření v Košeticích. *Meteorologické zprávy* 73 12–18. Praha .
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2020/CHMU_MZ_1-20.pdf.
- Lin, C.-C., C. Lin, L.-T. Hsieh, C.-Y. Chen, and J.-P. Wang. 2011. Vertical and Diurnal Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air in Urban Areas. *Journal of the Air & Waste Management Association* 61:714–720.
- Mocerino, L., F. Murena, F. Quaranta, and D. Toscano. 2020. A methodology for the design of an effective air quality monitoring network in port areas. *Scientific Reports* 10:300.
- Moldan, B. 2015. Podmaněná planeta . Second edition. Nakladatelství Karolinum, Praha.
- Salmond, J.A., D.E. Williams, G. Laing, S. Kingham, K. Dirks, I. Longley, and G.S. Henshaw. 2013. The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. *Science of The Total Environment* 443:287–298.
- Samad, A., U. Vogt, A. Panta, and D. Uprety. 2020. Vertical distribution of particulate matter, black carbon and ultra-fine particles in Stuttgart, Germany. *Atmospheric Pollution Research* 11:1441–1450.
- Schnitzhofer, R., M. Norman, A. Wisthaler, J. Vergeiner, F. Harnisch, A. Gohm, F. Obleitner, A. Fix, B. Neininger, and A. Hansel. 2009. A multimethodological approach to study the spatial distribution of air pollution in an Alpine valley during wintertime. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9:3385–3396.
- Seinfeld, J.H. 2004. Air pollution: A half century of progress. *AIChE Journal* 50:1096–1108.
- Shaw, M.D., J.D. Lee, B. Davison, A. Vaughan, R.M. Purvis, A. Harvey, A.C. Lewis, and C.N. Hewitt. 2015. Airborne determination of the temporo-spatial distribution of benzene, toluene, nitrogen oxides and ozone in the boundary layer across Greater London, UK. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15:5083–5097.
- Skelly, J.M., T.S. Fredericksen, J.E. Savage, and K.R. Snyder. 1996. Vertical gradients of ozone and carbon dioxide within a deciduous forest in Central Pennsylvania. *Environmental Pollution* 94:235–240.
- ThermoFisher Scientific. 2022. Thermo 49i.
<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/49I>.
- WHO. 2021. Ambient (outdoor) air pollution . [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

Yang, S., W. Yuesi, and Z. Changchun. 2009. Measurement of the vertical profile of atmospheric SO₂ during the heating period in Beijing on days of high air pollution. Atmospheric Environment 43:468–472.

Poznámka: Úplnosť, správnosť a samotná prítomnosť informácií, ktoré boli v tejto práci využité z vyššie uvedených internetových zdrojov, bola na jednotlivých zdrojových stránkach overená k 8.5.2022.

Zoznam tabuliek

Tab. 1 Prehľad hodnôt korelačného koeficientu pre jednotlivé korelované roky

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Národní atmosférická observatoř Košetice a atmosférický stožiar, snímka z dronu

Obr. 2 Grafické znázornenie priebehu cO₃ v hladinách 2, 8, 50 a 230 m nad zemským povrchom v medziročnom porovnaní

Obr. 3 Grafické znázornenie priebehu gradientu cO₃ vo vrstvách 50-8, 230-50 a 230-8 m nad zemským povrchom v medziročnom porovnaní

Obr. 4 Grafické znázornenie priebehu gradientu cO₃ vo vrstve 8-2 m nad zemským povrchom v medziročnom porovnaní

Obr. 5 Grafické znázornenie priebehu mediánov gradientu cO₃ vo vrstvách 50-8, 230-50 a 230-8 m nad zemským povrchom v medziročnom porovnaní

Obr. 6 Grafické znázornenie priebehu mediánov gradientu cO₃ vo vrstvách 50-8, 230-50 a 230-8 m nad zemským povrchom v letnom a zimnom období v medziročnom porovnaní

A Prílohy

Príloha A1 Hodnoty mediánov gradientu v jednotlivých rokoch

Rok	Medián			
	230-50 m	50-8 m	230-8 m	8-2 m
2014	0,41	x	x	x
2015	0,37	1,11	0,54	5,47
2016	0,39	1,53	0,59	-3,41
2017	0,29	1,28	0,51	-1,81
2018	0,40	1,63	0,68	0,07
2019	0,40	2,07	0,74	-1,91
2020	0,39	1,87	0,69	1,01

Príloha A2 Hodnoty mediánov gradientu v zimných a letných obdobiach

LO - letné obdobie: 1.4.-30.9.	Medián			
ZO - zimné obdobie: 1.10.-31.3.	230-50 m	50-8 m	230-8 m	8-2 m
ZO 2013/2014	0,43	x	x	x
LO 2014	0,50	x	x	x
ZO 2014/2015	0,30	x	x	x
LO 2015	0,40	1,55	0,65	7,62
ZO 2015/2016	0,36	0,87	0,46	0,82
LO 2016	0,40	2,07	0,74	-4,67
ZO 2016/2017	0,31	1,11	0,48	-4,32
LO 2017	0,30	1,76	0,58	-1,07
ZO 2017/2018	0,31	0,91	0,44	-2,15
LO 2018	0,49	2,28	0,86	2,60
ZO 2018/2019	0,35	1,47	0,58	-3,36
LO 2019	0,43	2,54	0,82	1,10
ZO 2019/2020	0,32	1,82	0,62	-7,73
LO 2020	0,42	2,16	0,72	4,61

Príloha A3**Počet platných hodnôt n pre jednotlivé vrstvy a roky**

Rok	Obdobie a jeho trvanie	Počet platných hodnôt n za obdobia					Počet platných hodnôt n za celý rok				
		230-50 m	50-8 m	230-8 m	8-2 m	max	230-50 m	50-8 m	230-8 m	8-2 m	max
2013	ZO 2013/2014	177	0	0	0	182	88	0	0	0	91
2014	LO 2014	142	0	0	0	183	323	0	0	350	364
	ZO 2014/2015	182	0	0	0	182					
2015	LO 2015	155	155	155	154	182	323	322	322	308	363
	ZO 2015/2016	169	168	168	167	183					
2016	LO 2016	159	159	166	166	182	334	265	272	269	364
	ZO 2016/2017	170	95	98	92	182					
2017	LO 2017	127	165	126	161	183	301	333	297	325	364
	ZO 2017/2018	178	172	172	170	182					
2018	LO 2018	170	170	170	169	179	349	343	343	339	360
	ZO 2018/2019	151	151	151	149	182					
2019	LO 2019	173	173	173	164	183	326	326	326	314	364
	ZO 2019/2020	182	182	182	177	183					
2020	LO 2020	173	173	173	169	183	264	264	264	255	274

Poznámka: Maximálne hodnoty n sú uvádzané ako suma dní s prebiehajúcimi meraniami v jednotlivých časových intervaloch. Z dôvodu absencie 6 dní v priebehu sledovaného obdobia nesúhlasia vždy maximálne hodnoty s celkovým počtom dní v danom roku.