Autoři: prof. Ing. Helena Raclavská, CSc.;

Ing. Marek Kucbel, Ph.D.; Ing. Jana Růžičková, Ph.D. a kol.

URGP: Odborné články

Posouzení vlivu uhelné skládky na celkovou prašnou depozici

RECENZE:

Mgr. Jiří Bílek, Ph.D.

Stížnosti občanů na provoz uhelných skládek vedly k zahájení intenzivního zkoumání vlivu uhelných skládek na životní prostředí pod záštitou řešitelského týmu z Vysoké školy báňské–Technické univerzity Ostrava (VŠB-TUO) a Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě (ZÚO).

V rámci objektivizace informací o skutečném vlivu uhelných skládek a imisní zátěže byla provedena studie s použitím tradičních a moderních instrumentačních metod. V současné době chybí v ČR limity pro celkovou prašnou depozici i pro koncentraci celkových částic v imisích (Total Suspended Particles – TSP s aerodynamickým průměrem < 100 µm) použitelné k vyhodnocení zátěže prachových emisí z uhelných skládek. Prašný spad byl využit pro identifikaci uhelných částic, která byla provedena optickými metodami. Dále byl pro identifikaci uhelných částic použit vztah mezi geochemickými markery, které charakterizují přítomnost uhlí a koncentraci black carbon (BC) měřenou in-situ přístrojem MicroAeth. Informace o plošné a prostorové distribuci uhelných částic v prašné depozici mohou sloužit pro nastavení koncentračních limitů, které budou bezpečné z hlediska vlivu na zdraví obyvatel a zároveň maximálního dosahu environmentální zátěže. Bylo zjištěno, že vliv uhelných skládek na širší okolí je nevýznamný a dosah znečištění uhelnými částicemi ze skládky se pohybuje maximálně do 1 km od tělesa skládky.

1. ÚVOD

Skladování uhlí na otevřeném prostranství může zejména během suchých obdobích roku vést k šíření uhelných prachových částic do širokého okolí. Zároveň především vyšší rychlost a směr větru může vést ke zvýšené prašnosti v okolí uhelných skládek (*Cheng et al., 2021*). Přičemž se odhaduje, že cca 30 % emisí uhelných částic z větrné eroze pochází z pohybu větru po uhelném složišti, 40 % ze samotné činnosti na skládce (nakládka a vykládka uhlí) a 30 % z provozu nákladních vozidel po uhelné skládce (*Kurniawan et al., 2021*).

V okolí uhelných skládek přispívají ke znečištění ovzduší uhelné částice fugitivního původu. Tyto částice lze identifikovat zejména v TSP a prašném spadu. Mezi hlavní zdroje znečišťování ovzduší při provozu uhelných skládek obecně patří činnosti jako nakládka a vykládka uhlí, větrná eroze ze složišť uhlí, resuspenze uhelných částic (*Rojano et al., 2016*) výška složiště uhlí, distribuce velikosti částic v závislosti na druhu uhlí (*Kurniawan et al., 2021*), vlhkost v povrchové vrstvě složiště (*Techarat a Tontiwachwuthikul, 2019*) a dále provoz na nezpevněných plochách a údržba místních komunikací (*Rojano et al., 2016*). Pro různé technologie a činnosti spojené s provozem uhelných skládek uvádí emisní faktory Trozzi et al. (2016). Emisní limit pro TSP pro kontrolovanou manipulaci s uhlím je stanoven na hodnotu 0,089 kg/t, pro nekontrolované skládkování uhlí pak 10,25 t/ha/rok a pro skládkování kontrolované je opatření 1,025 t/ha/rok.

Prašný spad kontinuálně dopadá suchými a/nebo mokrými depozičními procesy na zemský povrch (*Norouzi et al., 2017*). Pro prašný spad je typická vysoká proměnlivost chemického složení, různá morfologie a velikost částic, což odpovídá původu částic (*de Ferreyro Monticelli et al., 2020*). Rychlost depozice prachových částic je ovlivňována širokou škálou faktorů: koncentrace prachu v atmosféře, rychlost větru, vlastnosti depozičního prostředí, typ zdroje emisí, vzdálenost zdroje, umístění místa odběru vzorků a meteorologické podmínky (*Morselli et al., 2003*). V prašném spadu převažují hrubozrnnější částice (pocházející z lokálních zdrojů) nad částicemi s menším aerodynamických průměrem, které mohou být spjaty s dálkovým transportem (*AECOM, 2016*). Prašný spad je často tvořen suspendovanými částicemi (TSP), které představují komplexní směs organických a anorganických látek v kapalném a tuhém stavu suspendovaných ve vzduchu s rozsahem velikostí částic <0,1 až 100 µm (*Jia et al., 2022*). Metoda měření prašného spadu pomocí informativní sedimentační metody je zatížena určitou chybou, avšak pro relativní hodnocení imisní zátěže jednotlivých území poskytuje dobře použitelné výsledky (*Hančuľák et al., 2005*).

Přesto, že sledování prašného spadu není v ČR ani v Evropě v současné době podporováno legislativou, neexistuje jiná metoda, jak vyjádřit množství prachu, které může významně obtěžovat obyvatele a ovlivňovat terestrické a akvatické ekosystémy. Prašný spad byl dříve definován v rámci Nařízení vlády č. 429/2005 Sb. („Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 350/2002 Sb., kterým se stanoví imisní limity a podmínky a způsob sledování, posuzování, hodnocení a řízení kvality ovzduší, ve znění nařízení vlády č. 60/2004 Sb.“). V roce 2006 však došlo ke zrušení tohoto nařízení, a tím zanikla povinnost sledovat prašný spad. Toto nařízení však stanovovalo limitní koncentraci prašného spadu 12,5 g/m^2/30 dní. NWS EPA Austrálie má stanovenou maximální celkovou hodnotu prašného spadu na 4 g/m^2/30 dní (NWS EPA, 2017). Některé země (např. Kanada, Argentina, Austrálie, USA, Španělsko a Finsko) zavedly své vlastní národní standardy. Převážná většina limitních hodnot pro prašný spad se pohybuje v rozmezí od 3,0 do 15,0 g/m^2/30 dní (*Sow et al., 2006*).

Atmosférické prachové částice (PM) lze charakterizovat jako rozmanitou směs elementárního uhlíku (EC) či black carbon (BC), organického uhlíku (OC), síranů (SO_4^{2-}), dusičnanů (NO_3^-), amonných iontů (NH_4^+), minerálního prachu, těžkých kovů a dalších stopových prvků (*Zhang et al., 2020*). Uhlíkaté částice v prachových částicích tvoří 10–50 % z PM_{10}, jsou produktem nedokonalého spalování fosilních paliv, biomasy a biopaliv (*Alfoldy et al., 2021*), OC pochází nejen ze stejných primárních zdrojů jako EC, ale rovněž může být sekundárního původu (kondenzace sloučenin vytvořených během fotochemických reakcí v ovzduší apod.), případně představuje částice primární biomasy nebo fragmenty organizmů (*Giannoni et al., 2016; Alvarez-Ospina et al., 2016*).

Částice black carbon jsou významnou části uhlíkatých aerosolů, které jsou produktem nedokonalého spalování fosilních paliv a biomasy z lokálních topenišť, dopravy, průmyslových zdrojů, elektráren atd. a tvoří více než 50 hm.% z $PM_{2.5}$ (*Wyche et al., 2020*). *Cavalli et al.* (2016) uvádí, že v městském evropském ovzduší při-

spívá 5–15 % k hmotnostním koncentracím PM (*Cavalli et al., 2016*). Přítomnost uhlíkatých částic v atmosféře ovlivňuje radiační bilanci a klima Země a rovněž lidské zdraví v regionálním až globálním měřítku (*Witkowska et al., 2016*). Black carbon se definuje jako látka, která je tvořená uhlíkem, ideálně absorbuje sluneční záření. Velký měrný povrch částic BC emitovaných do ovzduší umožňuje adsorpci různých polutantů (polycyklických aromatických uhlovodíků, těžkých kovů atd.), a proto představuje nebezpečí pro lidský organismus (*Alfoldy et al., 2021*). Epidemiologické studie uvádějí pozitivní souvislosti mezi BC a kardiovaskulárními a respiračními onemocněními. Přestože jsou částice BC asociovány s výše jmenovanými negativními vlivy stále jětě v rámci EU nexistujé žádný legislativní předpis, který by stanovil limitní koncentrace pro BC (*Rovira et al., 2022*). V aerosolu sledovaném v Evropě představují koncentrace BC pouze malý zlomek z celkového množství uhlíkatých částic. BC tvoří v průměru méně než 10 % celkové hmotnostní koncentrace $PM_{2.5}$ a PM_{10} (*Zanatta et al., 2016*). Průměrné koncentrace BC pro Ostravu (2012–2014) činí 3,48 ± 3,04 µg/m^3. Pro srovnání jsou uvedeny dále průměrné koncentrace BC z výsledků studií provedených na území Evropy (*Kucbel et al., 2017*). Průměrná koncentrace BC v Zabrze (Polsko) činí 3,82 ± 4,23 µg/m^3 (2009 –2020); v Helsinkách (Finsko, říjen 2015–květen 2017) průměrné koncentrace BC činí 1,69 µg/m^3, v Madridu (Španělsko, 2015) 2,33 µg/m^3 a pro městské stanice v Německu (2005–2014) BC = 2,07 µg/m^3 (*Zioła et al., 2021*).

Drony neboli bezpilotní letadlo UAV (*Unmanned Air Vehicles*) nabízejí v oblasti monitorování a ochrany životního prostředí množství výhod. Při monitoringu znečištění ovzduší UAV poskytují okamžité výsledky. Jedná se o relativně nenáročnou, levnou a velmi efektivní metodu, ve srovnání s konvenčním finančně velmi nákladným imisním monitoringem (*Ren et al., 2019; Bieber et al., 2020*). Na druhou stranu nevýhodou těchto systému je omezená doba letu z důvodu kapacity baterií, vliv turbulentního víření, ale také koncentrační rozsah senzorů pro detekci látek znečišťujících ovzduší (LZO) v závislosti na zdrojích znečištění (*Cárdenas et al., 2018; Villa et al., 2016*). V současné době UAV vybavené miniaturními senzory pro detekci plynných látek a prachových částic mohou kompenzovat nedostatek dat z tradičních monitorovacích stanic a lze je využít pro analýzu i simulaci nejrůznějších LZO jako: PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1, black carbon (BC), CO_2, SO_2, NO, NO_2, NH_3 aj. (*Xiang et al., 2018*).

Většina současných měření koncentrací black carbon (BC) je stále pozemních s využitím Aethalometru. Nicméně se začínají objevovat i technické přístupy pro vertikální distribuci BC s využitím UAV (*Wu et al., 2021; Lee et al., 2020*).

Za účelem zjištění imisní zátěže v okolí uhelné skládky ÚKZ PKP Cargo Karviná Barbora byla zvolena tradiční metoda identifikace uhelných částic v prašném spadu a zároveň použití moderní techniky pro sledovaní prostorové distribuce uhelných částic (ekvivalent black carbon).

2. METODY A MATERIÁLY

2.1. Metoda stanovení prašného spadu

Sedimentační nádoby o objemu 1 litr s vnitřním průměrem 90 ± 2 mm, výškou 145 mm byly umístěny v držáku ve výšce cca 3 m nad povrchem. Za účelem vyloučení vlivu větrného stínu nosného sloupu byla na odběrném místě umístěna vždy dvojice sedimentačních nádob. Sedimentační nádoba byla naplněná 250 ml destilované vody obsahující 25 ml propanolu nebo izopropanolu. Odkryté sedimentační nádoby byly exponovány na daném místě vždy po dobu 30 dní. Následně byl obsah lahví kvantitativně přenesen na zvážené odpařovací misky a při 105 °C došlo k odpaření do konstantní hmotnosti a zvážení. Hmotnost sedimentu byla v každé láhvi stanovena zvlášť. Výpočet byl proveden dle rovnice 1 uvedené ve zrušeném nařízení vlády č. 429/2005 Sb.: (1)

$$Prašný\ spad = 3{,}82 \cdot 10^5 \cdot \frac{a}{d^2} \cdot e\ (g/m^2\ za\ 30\ dní)$$

Kde: *a – hmotnost zachyceného sedimentu uvedená v gramech*; *e – expozice ve dnech*; *d – průměr sedimentační nádoby uveden v cm.*

Za účelem zjištění prašné depozice bez vlivu vegetace, byly mapy konstruovány pro podzimní (listopad 2020) a zimní měsíce (prosinec 2020). Pro zpřesnění informací, byl prašný spad monitorován v průběhu celého roku 2021.

2.2. UAV měření

Vertikální monitorování bylo prováděno pomocí hexakoptéry (UAV Matrice 600, DJI, Čína). Během letu dron stoupal vertikálně ze zemského povrchu do 100 m konstantní rychlostí 1 m/s, byly monitorovány výšky 10, 20, 30, 40, 60, 80 a 100 m, měření v každé výšce po dobu 90 s.

2.3. Metoda stanovení koncentrací black carbon

Princip stanovení koncentrace black carbon (BC) spočívá v měření útlumu paprsku světla procházejícího přes filtr z křemenných vláken, na kterém jsou nepřetržitě zachycovány aerosolové

částice. Pro měření BC byl použit MicroAeth/MA200, který je vhodný pro kompaktní monitoring UV-IR BC s pěti vlnovými délkami (375, 470, 528, 625 a 880 nm) s automatickým systémem posunu filtrační pásky. Pro kvantitativní a kvalitativní stanovení BC byly použity koncentrace získané z IR (880 nm) kanálu mikroaethalometru. Detekční limit MA200 je 30 ng/m^3 při časovém rozlišení 1 sekunda, průtok 150 ml/min (*AethLabs, 2018*). Interval záznamu dat u MA200 byl nastaven na 1 s, aby odpovídal rychlosti vzestupu/sestupu UAV (1 m/s), čímž bylo dosaženo vertikálního rozlišení 1 m pro BC.

Koncentrace BC byly přepočteny na množství uhelných částic. K přepočtu byly využity analýzy organických sloučenin charakterizujících uhelnou složku v PM_{10} provedené metodou tepelné desorpce s plynovou chromatografii a hmotnostní spektrometrií (TD-GC/MS). Pro vytvoření přepočtového koeficientu bylo použito 28 paralelních analýz. Stanovení podílu uhelných částic bylo provedeno na základě výskytu geochemických markerů (hopany, alkylfenantreny, alkylnaftaleny, isoprenoidní uhlovodíky, sterany, terpeny) a doprovodných sloučenin (alkany, karboxylové kyseliny, ketony, PAHs). Doprovodné sloučeniny byly verifikovány diagnostickými poměry, např. CPI indexem (carbon preference index – podíl lichých C_n/sudým C_n), který je používaný k určení zdroje a zralosti organické hmoty.

2.4. Vzorkovaná oblast

Vzorkovaná oblast Karviná Barbora (uhelné skládky ÚKZ PKP Cargo Karviná Barbora) se nachází v areálu logisticko-distribučního centra Barbora v lokalitě ÚZK (Upravárenský závod Karviná) Karviná (areál bývalého Dolu Barbora), katastrální území Karviná–Doly. Areál je situován v lokalitě silně ovlivněné důlní činností mezi městy Karviná a Havířov v Ostravsko-karvinské uhelné pánvi. V nejbližším okolí zájmové lokality se nachází teplárna, administrativní budovy a výrobní areály, které sloužily jako zázemí dolu (recyklace a drobný prodej inertního materiálu v areálu dolu Barbora). Nejbližší obytná zástavba se nachází cca 600 m od areálu. Imisní situace lokality je ovlivněna významnými zdroji znečišťování v aglomeraci, v zimním období dálkovým přenosem imisí z Polska, místně pak lokálními zdroji (domácí topeniště v zimním období). Vzorkování prašného spadu bylo realizováno na 10 lokalitách zobrazených v *tabulce 1*.

Na lokalitě ÚKZ PKP Cargo, Barbora od listopadu 2020 do prosince 2021 převažovalo velmi mírné proudění vzduchu s rychlostí větru 0-5 m/s. Nejvýznamnější jsou směry JZ, JV a V. Z roční průměrné větrné růžice pro uhelnou skládku Barbora se ukázalo, že dominují JZ, JV a V směry větru. V jednotlivých ročních obdobích převládá JZ a Z směr větru (směrem na Ostravu a Havířov), těleso uhelné skládky Barbora se nachází ve V až JV směru větru.

2.5. Konstrukce map

Pro interpolaci byla zvolena metoda inverzních vzdáleností (IDW – inverse distance weighted). Metoda předpokládá prostorovou autokorelaci sledovaných jevů. Při výpočtu hodnoty neznámého bodu v interpolovaném poli je výsledná hodnota odhadovaného bodu ovlivněna nejbližšími známými body nejvíce. S rostoucí vzdáleností klesá vliv naměřené hodnoty na odhadovaný bod. Metoda respektuje naměřené hodnoty v měřících bodech, naproti tomu nedostatkem této metody je tvorba koncentrických izolinií okolo vstupních bodů. Pro zpracování dat byl využit software ArcGIS Desktop verze 10.5 s nadstavbou ArcGIS Spatial Analyst pro pokročilé prostorové analýzy. Mapy byly vytvořeny společnosti E-expert s.r.o.

Tab.1: Měřící místa (MM) s GPS souřadnicemi.

Vzorkovaná lokalita	GPS X	GPS Y
MM1_Kostel sv. Petra z Alcantary	18.4887931	49.8349213
MM2_Opuštěný sloup	49.8293008	18.4707378
MM3_Důl Barbora	49.8241914	18.4733625
MM4_Nosná konstrukce teplárenského potrubí	18.482405	49.8279525
MM5_PKP Cargo váha	49.8240836	18.4811672
MM6_PKP Cargo střed	49.8234481	18.4823564
MM7_PKP Cargo u rampy	49.8241256	18.4811122
MM8_Energomost (jižně od teplárny)	49.8202908	18.4786892
MM9_Odkaliště remíza	49.8133631	18.4683414
MM10_Green gas	49.8068208	18.4727436

Období	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10
listopad (3.11.2020 - 27.11.2020)	1,1	1,0	4,5	8,2	3,4	**40,2**	1,7	1,1	1,5	0,5
prosinec (27.11.2020 - 30.12.2020)	0,5	1,1	2,1	4,0	4,2	**18,0**	0,5	0,5	0,5	0,5
leden (30.12.2020 - 29.1.2021)	0,5	1,6	4,4	1,3	2,6	1,7	0,5	0,5	0,5	0,5
únor (29.1.2021 - 26.2.2021)	3,0	1,7	3,4	2,0	2,0	5,2	3,6	1,8	3,1	3,6
březen (26.2.2021 - 30.3.2021)	1,4	2,5	5,6	1,7	5,5	**33,0**	2,6	2,0	9,6	1,6
duben (30.3.2021 - 30.4.2021)	2,4	4,1	6,3	2,0	7,2	**25,9**	6,8	2,8	8,5	2,4
květen (30.4.2021 - 28.5.2021)	2,3	6,9	11,5	4,1	11,4	**17,4**	5,0	2,9	5,9	3,6
červen (28.5.2021 - 29.6.2021)	5,8	9,4	**15,5**	7,1	8,2	8,6	8,6	5,9	**13,4**	6,6
červenec (29.6.2021 - 28.7.2021)	3,2	5,5	**17,3**	8,1	6,9	**13,4**	5,3	3,4	11,7	5,2
srpen (28.7.2021 - 31.8.2021)	2,2	8,0	7,7	2,7	9,9	**14,0**	4,0	5,5	10,8	3,5
září (31.8.2021 - 29.9.2021)	5,3	4,1	4,1	3,9	4,2	9,6	2,0	2,8	**14,4**	0,5
říjen (29.9.2021 - 26.10.2021)	1,7	6,9	4,2	3,0	**17,9**	**41,5**	4,6	4,5	2,3	1,1
listopad (26.10.2021 - 26.11.2021)	1,0	2,9	3,5	4,7	8,9	**15,0**	1,6	2,3	0,5	2,2
prosinec (26.11.2021 - 30.12.2021)	1,3	0,5	3,3	2,8	10,7	5,1	5,4	1,1	4,1	4,1
Průměr ± směrodatná odchylka 2021	2,5±1,6	4,5±2,8	7,2±4,9	3,6±2,1	8,0±4,4	15,9±12,0	4,2±2,3	3,0±1,6	7,1±5,0	2,9±1,9

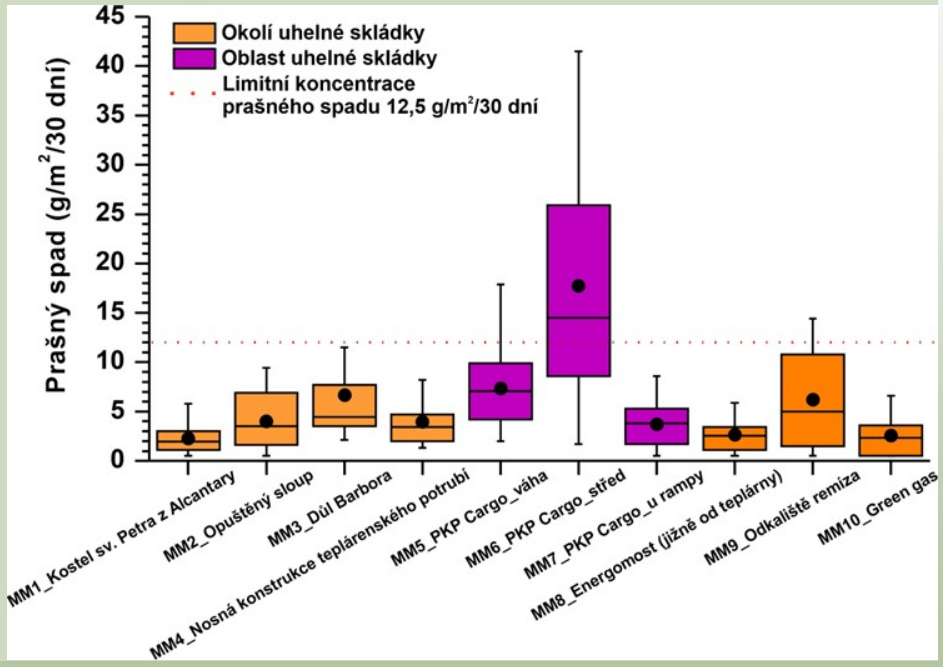
Tab.2: Množství prašného spadu pro sledované lokality (g/m^2/30 dní).

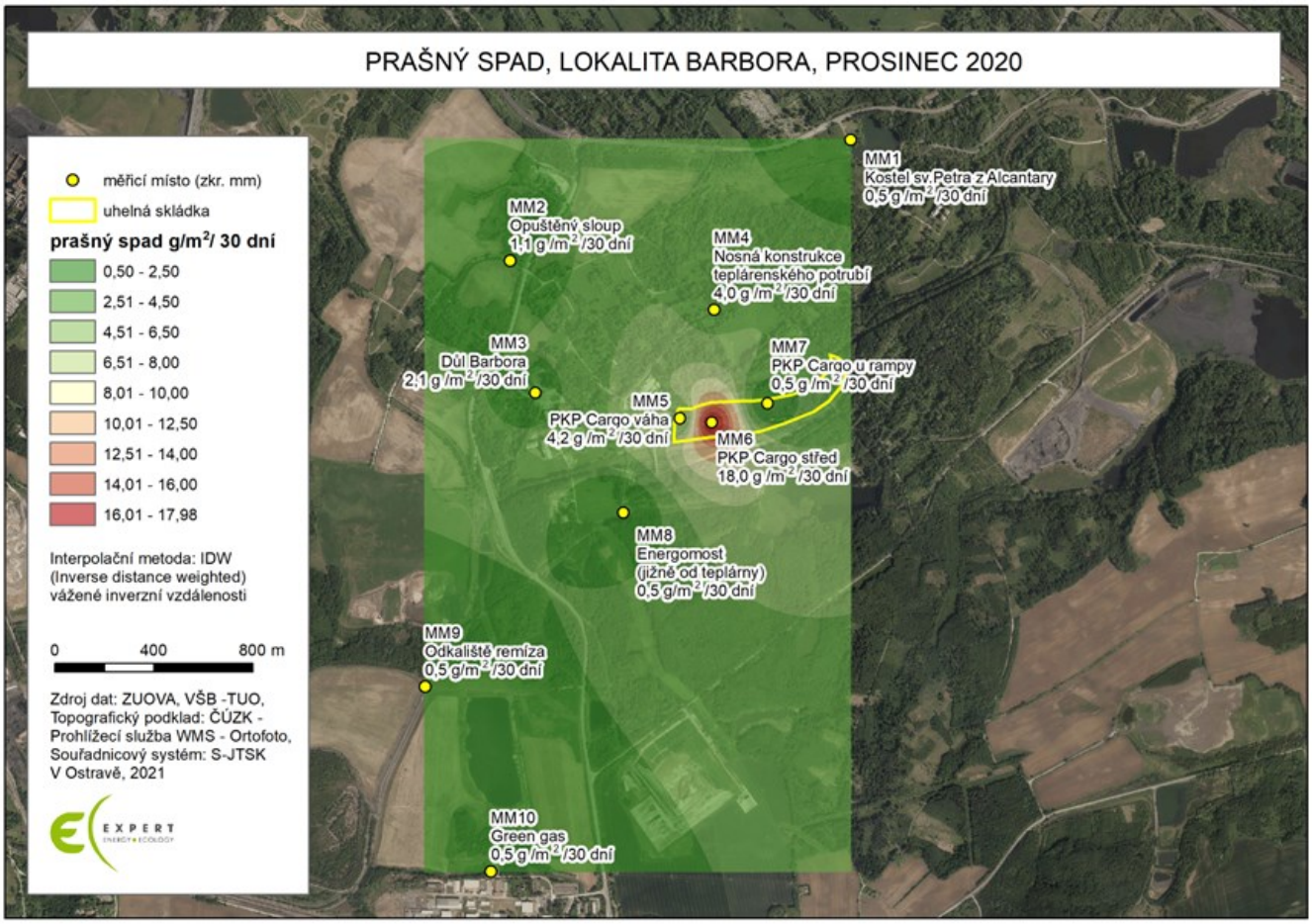
3. VÝSLEDKY

Přímo v tělese uhelné skládky se průměrné množství prašného spadu od listopadu 2020 do prosince 2021 pohybovalo v rozmezí 3,7 ± 2,4 až 17,8 ± 12,8 g/m^2/měsíc s průměrnou hodnotou pro celou oblast (10 lokalit) 5,72 ± 6,59 g/m^2/měsíc. Maximální množství prašného spadu bylo naměřeno vždy ve středu skládky v rozpětí hodnot 1,7 až 41,5 g/m^2/měsíc, viz *tabulka 2*. V listopadu 2020 bylo zjištěno 40,2 g/m^2/měsíc a v listopadu 2021 bylo množství prašného spadu 2,7krát nižší (15,0 g/m^2/měsíc). Širší okolí skládky nebylo v průběhu celého roku výrazně ovlivněno (obrázek 1*)*. Průměrné množství prašného spadu se na všech sledovaných lokalitách s výjimkou MM6_PKP Cargo střed pohybovalo pod hodnotou 12 g/m^2/měsíc. Průměrná hodnota pro měřící bod MM6_PKP Cargo střed činila 17,8 ± 12,8 g/m^2/měsíc. Data získaná z oblasti skládky PKP Cargo (ÚKZ, Barbora) byla po vyloučení anomálních hodnot (červeně označených v *tabulce 2*) použita pro výpočet hodnoty geochemického pozadí pro prašný spad (4,00 ± 2,86 g/m^2/měsíc).

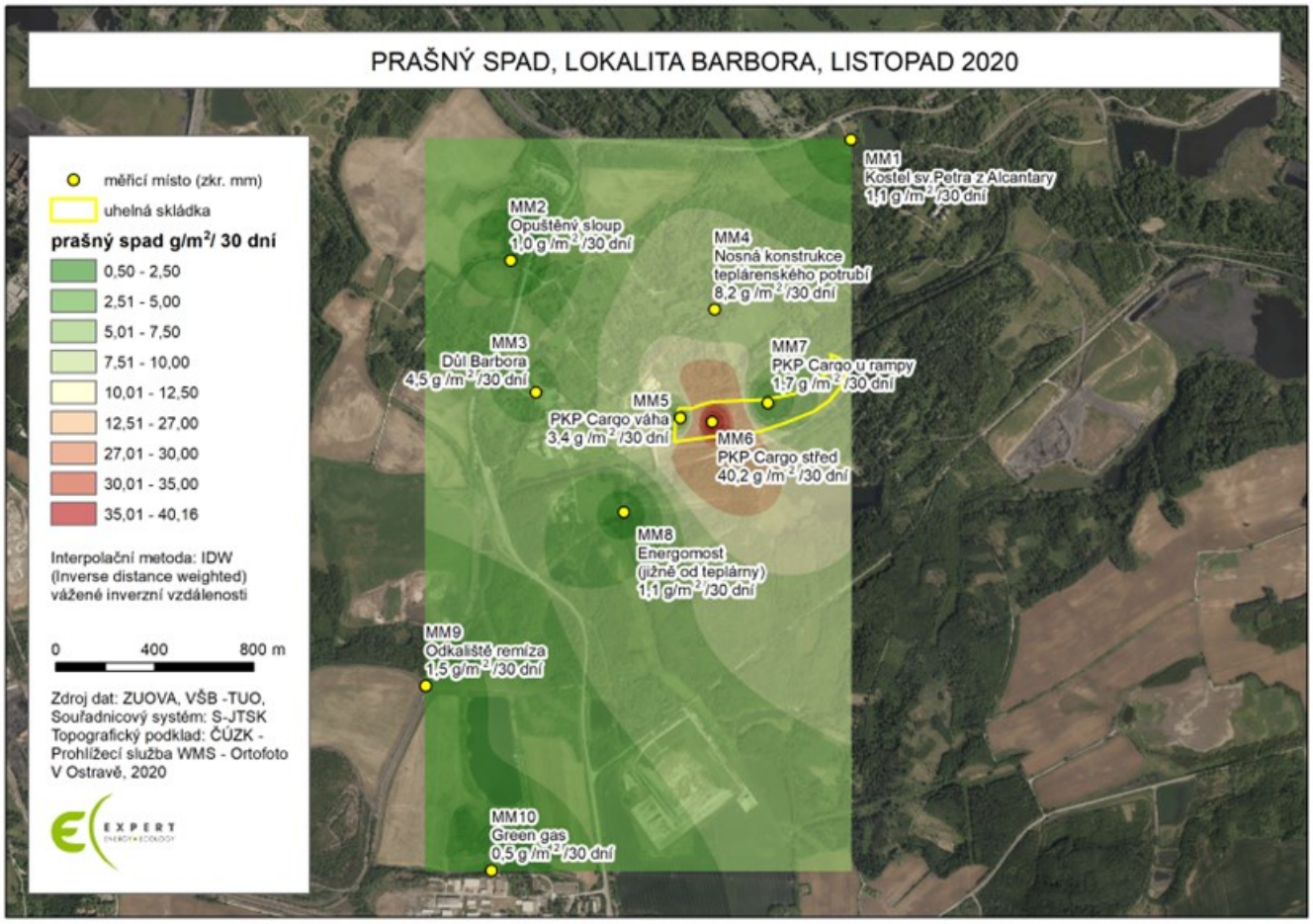
Na všech lokalitách v oblasti PKP Cargo, Barbora vykazovala velikost částic v prašném spadu unimodální rozdělení. Největší hodnota d050 (střední velikost částic) byla naměřena pro lokalitu důl Barbora (MM3), kde je odběrové místo situováno v rámci komunikace a parkovací plochy před areálem (nečinného dolu), ale na příjezdové cestě směrem k teplárně Karviná a ÚZK PKP Cargo. Velikost částic je v tomto případě ovlivněna hlavně dopravou spojenou s resuspenzí částic z komunikace. Střední hodnota d050 se vyskytuje v rozmezí 71 až 142 µm. Hodnota 142 µm je ovlivněna přítomností biomasy (verifikace SEM-EDAX: skenovací elektronovou mikroskopii s mikroanalýzou EDAX). Průměrné množství biogenní hmoty v prašném spadu (rok 2021) stanoveného v tělese skládky ÚZK PKP Cargo Barbora (MM5, MM6 a MM7) činilo 6,32 ± 3,57 g/m^2/30 dní (64,33 ± 17,9 % z prašného spadu) resp. anorganické hmoty 3,50 ± 2,86 g/m^2/30 dní (35,7 ± 17,9 % z prašného spadu). Metodou SEM-EDAX byl výskyt uhelných částic souvisejících s bezprostředním provozem skládky potvrzen pouze na lokalitách v rámci samotného tělesa skládky (MM5, MM6 a MM7).

Obr.1: Rozložení koncentrací prašného spadu na jednotlivých lokalitách v období od listopadu 2020 až prosinec 2021.





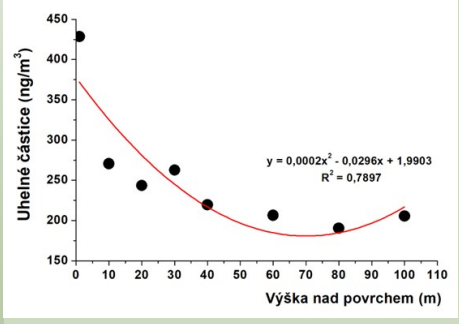
Obr.2: Mapa plošné distribuce prašného spadu v okolí uhelné skládky PKP Cargo Karviná pro vybraná měřicí místa (MM) v listopadu 2020.



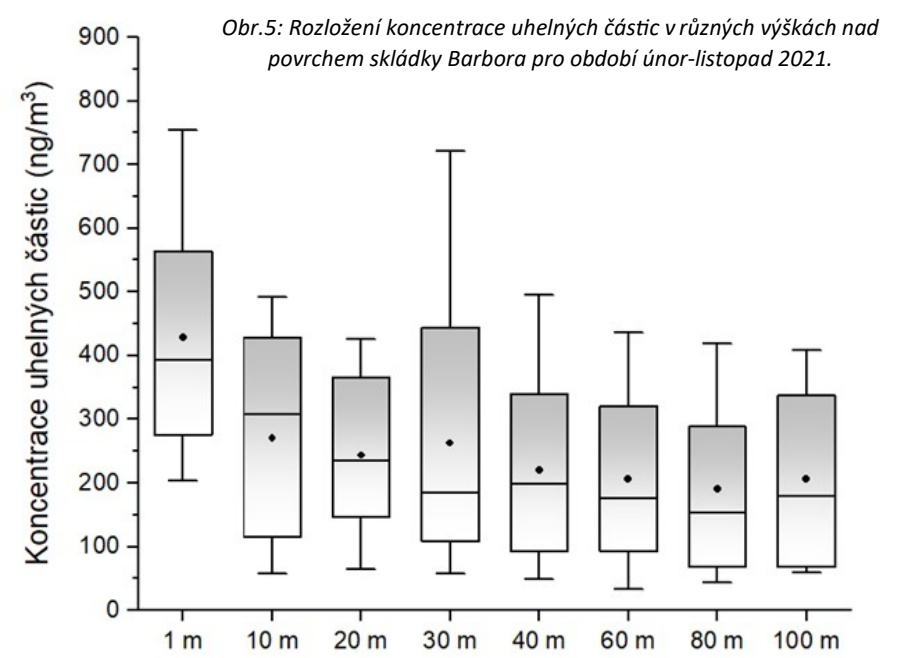
Obr.3: Mapa plošné distribuce prašného spadu v okolí uhelné skládky PKP Cargo Karviná pro vybraná měřicí místa (MM) v listopadu 2021.

Z výsledků na obrázcích 2 a 3 je patrné, že nepatrnou anomálii prašného spadu, lze zaznamenat pouze ve středu tělesa uhelné skládky během listopadu i prosince 2020. Tato skutečnost byla dále potvrzena i na základě pozorování prašného spadu realizovaného v roce 2021. Lze tedy konstatovat, že vliv uhelných skládek na širší okolí je nevýznamný a dosah znečištění uhelnými částicemi ze skládky se pohybuje maximálně od 500 do 1000 m. Rozptyl uhelných částic je ovlivněn velikosti d050 a meteorologickými podmínkami. Bylo prokázáno, že uhelná skládka příliš neovlivňuje imisní zátěž v okolí, což potvrdily i výsledky prostorové (vertikální) distribuce uhelných částic.

Vertikální měření distribuce uhelných částic byla realizována ve středu tělesa uhelné skládky (MM6) od února do listopadu 2021 s měsíční frekvencí. Prostorová distribuce byla sledována pro uhelné částice ve výšce 1, 10, 20, 30, 40, 60, 80 a 100 m nad povrchem skládky. Mezi množstvím uhelných částic a výškou byl zjištěna statisticky významná závislost polynomického charakteru s hodnotou r = 0,89 (α = 0,05), viz obrázek 4. Průměrná roční koncentrace uhelných částic klesá se vzdáleností od povrchu skládky. Nejvyšší průměrná koncentrace uhelných částic byla naměřena ve výšce 1 m nad povrchem skládky s hodnotou 428,58 ± 187,20 ng/m^3 a nejnižší 190,51 ± 136,59 ng/m^3 byla naměřena pro výšku 80 m.



Obr.4: Polynomická závislost mezi koncentrací uhelných částic a vzdáleností od povrchu pro celé období únor-listopad 2021.



Obr.5: Rozložení koncentrace uhelných částic v různých výškách nad povrchem skládky Barbora pro období únor-listopad 2021.

Množství uhelných částic s výškou klesá, což odpovídá údajům zjištěným pro PM_{10}, $PM_{2.5}$ a PM_1 (*Deng et al., 2014*). U většiny fugitivních zdrojů jako jsou odvaly a skládky se vliv zvýšené koncentrace PM_{10} pohybují ve výšce 30 až 40 m nad tělesem, jak bylo zjištěno pomocí měření balonem v oblasti Ostravska (*Štrbová et al., 2017*). K nárůstu prachových částic může docházet v inverzní vrstvě, která se v oblasti Ostravska vytváří v nadmořské výšce nad 350-365 m n.m., což odpovídá výšce 123-138 m nad povrchem (*Štrbová et al., 2017*). Výsledky měření z dronu prokázaly, že fugitivní zdroj (uhelná skládka) ovlivňuje výskyt uhelných částic do výšky cca 30 m, nejvýznamněji pouze v přízemní výšce do 10 m, viz obrázek 4 a obrázek 5.

ZÁVĚR

Z výsledků studie se ukázalo, že skladování uhlí na otevřeném prostranství nepřispívá ke zhoršení imisní zátěže v blízkém okolí tělesa skládky. Dosah znečištění uhelnými částicemi ze skládky se pohybuje maximálně od 500 do 1000 m. Metodou SEM-EDAX byl výskyt uhelných částic souvisejících s bezprostředním provozem skládky zjištěn pouze na lokalitách v rámci samotného tělesa skládky (MM5, MM6 a MM7). Prašný spad byl na všech sledovaných lokalitách tvořen převážně biogenní hmotou (více než 60 %). Měření black carbon s využitím bezpilotního letadla prokázalo, že zvýšený výskyt uhelných částic lze zaznamenat do výšky 30 m. Rozdíl mezi koncentraci uhelných částic v přízemní vrstvě (1 m) je více než dvojnásobně vyšší oproti koncentracím ve výškách 60 až 100 m. Použití moderních přístupů (technika pro identifikaci uhelných částic) přináší přesnější výsledky a lepší detekci fugitivních emisí z uhelných skládek.

PODĚKOVÁNÍ

Výsledky práce vznikly v rámci projektu *SS01020432 Posouzení vlivu uhelných skládek na životní prostředí*. Projekt je financován státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Prostředí pro život 1. Poděkování patří vedení firmy PKP Cargo International a.s. a pracovníkům uhelné skládky ÚZK PKP Cargo Karviná Doly, kteří umožnili řešitelskému týmu realizaci získání dat z reálných měření.

SEZNAM LITERATURY:

AECOM Australia. 2016. Lower Hunter Dust Deposition Study-Final Report.

AETHLABS: MicroAeth® MA Series MA200, MA300, MA350 Operating Manual. Dostupný: https: //aethlabs.com/sites/all/content/microaeth/maX/MA200MA300MA350OperatingManualRev03Dec2018.pdf

ALFOLDY, B., M.M. MAHFOUZ, A. GREGORIČ, M. IVANČIČ, I. JEŽEK a M. RIGLER. Atmospheric concentrations and emission ratios of black carbon and nitrogen oxides in the Arabian/Persian Gulf region. *Atmospheric Environment*. 2021, 256. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118451.

ALVAREZ-OSPINA, H., O. PERALTA, T. CASTRO a M. I. SAAVEDRA. Optimum quantification temperature for total, organic, and elemental carbon using thermal-coulombimetric analysis. *Atmospheric Environment*. 2016, 145, 74-80.

BIEBER, P., T.M. SEIFRIED, J. BURKART, J. GRATZL, A. KASPER-GIEBL, D.G. SCHMALE a H. GROTHE. A drone-based bioaerosol sampling system to monitor ice nucleation particles in the lower atmosphere. *Remote Sens.* 2020, 12, 552.

CÁRDENAS, A.M., L.M. RIVERA, B.L. GÓMEZ, G.M. VALENCIA, H.A. ACOSTA a J.D. CORREA. Short Communication: Pollution-and-greenhouse gases measurement system. *Measurement*. 2018, 129, 565-568. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2018.07.039.

CAVALLI, F., A. ALASTUEY, H. ARESKOUG et al. A European aerosol phenomenology - 4: Harmonized concentrations of carbonaceous aerosol at 10 regional background sites across Europe. *Atmospheric Environment*. 2016, 144, 133-145.

CHENG, J., X. ZHENG, Y. LEI et al. A compound binder of coal dust wetting and suppression for coal pile. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021, 147, 92-102. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2020.08.031.

DE FERREYRO MONTICELLI, D., J.M. SANTOS, H.O. DOURADO, D.M. MOREIRA a N.C. REIS JR. Assessing particle dry deposition in an urban environment by using dispersion models. *Atmospheric Pollution Research*. 2020, 11(1), 1-10. ISSN 13091042. Dostupné z: doi:10.1016/j.apr.2019.07.010.

DENG, X., F. LI, Y. LI, J. LI, H. HUANG a X. LIU. Vertical distribution characteristics of PM in the surface layer of Guangzhou. *Particuology.* 2015, 20, 3-9.

GIANNONI, M., G. CALZOLAI, M. CHIARI, A. CINCINELLI, F. LUCARELLI, T. MARTELLINI a S. NAVA. A comparison between thermal-optical transmittance elemental carbon measured by different protocols in $PM_{2.5}$ samples. *Science of the Total Environment.* 2016, 571, 195–205.

HANČUĽÁK, J., M. BOBRO, J. BREHUV a P. SLANČO. Deposition of heavy metals from dust fallout in selected areas of Eastern Slovakia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2005, 10, 246-252.

JANSSEN, N. A. H., HOEK, G., SIMIC-LAWSON, M. et al. Black Carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM_{10} and $PM_{2.5}$. *Environmental Health Perspectives.* 2011, 119, 1691-1699.

JIA, Z.L., Ch.Y. ZHU, R.S. RAJENDRAN, Q. XIA, K.Ch. LIU a Y. ZHANG. Impact of airborne total suspended particles (TSP) and fine particulate matter ($PM_{2.5}$)-induced developmental toxicity in zebrafish (Danio rerio) embryos. *Journal of Applied Toxicology*. 2022, 1-18. ISSN 0260-437X. Dostupné z: doi:10.1002/jat.4325.

KUCBEL, M., A. CORSARO, B. ŠVÉDOVÁ, H. RACLAVSKÁ, K. RACLAVSKÝ a D. JUCHELKOVÁ. Temporal and seasonal variations of black carbon in a highly polluted European city: Apportionment of potential sources and the effect of meteorological conditions. *Journal of Environmental Management.* 2017, 203, 1178-1189.

KURNIAWAN, S., H.S. HUBOYO a B.P. SAMADIKUN. Prediction of coal dust dispersion to total suspended particulate (TSP) concentration in ambient air quality, case study: PLTU Tanjung Jati B. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, 623(1). ISSN 1755-1307. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/623/1/012035.

LEE, J., J. PARK a J. KIM. Vertical measurement of equivalent black carbon concentration at low altitude. *Applied Sciences*. 2020, 10(15). ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10155142.

MORSELLI, L., P.OLIVIERI, B. BRUSORI a F. PASSARINI. Soluble and insoluble fractions of heavy metals in wet and dry atmospheric depositions in Bologna, Italy. *Environmental Pollution*. 2003, 124(3), 457-469. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/S0269-7491(03)00013-7.

New South Wales (NWS) and the Environment Protection Authority (EPA). Approved methods for the modelling and assessment of air pollutants in New South Wales. 2017. ISBN 9781760395650.

NOROUZI, S., H. KHADEMI, S. AYOUBI, A.F. CANO a J.A. ACOSTA. Seasonal and spatial variations in dust deposition rate and concentrations of dust-borne heavy metals, a case study from Isfahan, central Iran. *Atmospheric Pollution Research*. 2017, 8(4), 686-699. ISSN 13091042. Dostupné z: doi:10.1016/j.apr.2016.12.015.

REN, H., Y. ZHAO, W. XIAO a Z. HU. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2019. 6(3), 320-333. Dostupné z: doi:10.1007/s40789-019-00264-5.

ROJANO, R., H. ARREGOCÉS, L. ANGULO a G. RESTREPO. PM_{10} emissions due to storage in coal piles in a mining industrial area. WIT Press: *Air Pollution* XXIV. 2016, 87-97.

ROVIRA, J., J.A. PAREDES-AHUMADA, J.M. BARCELÓ-ORDINAS et al. Non-linear models for black carbon exposure modelling using air pollution datasets. *Environmental Research*. 2022, 212. ISSN 00139351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2022.113269.

SOW, M., D. GOOSSENS a J.L. RAJOT. Calibration of the MDCO dust collector and of four versions of the inverted frisbee dust deposition sampler. *Geomorphology*. 2006. 82(3-4), 360-375. ISSN 0169555X. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2006.05.013.

ŠTRBOVÁ, K., H. RACLAVSKÁ a J. BÍLEK. Impact of fugitive sources and meteorological parameters on vertical distribution of particulate matter over the industrial agglomeration. *Journal of Environmental Management*. 2017, 203, 1190-1198.

TECHARAT, P. a P. TONTIWACHWUTHIKUL. Coal dust dispersion from a coal storage pile. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2020, 42(3), 557-563.

TROZZI, C. et al. *Fugitive emissions from solid fuels: Coal mining and handling.* EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016.

VILLA, T., F. GONZALEZ, B. MILJEVIC, Z.D. RISTOVSKI a L. MORAWSKA. An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future prospectives. *Sensors.* 2016, 16, 1072.

WITKOWSKA, A., A. LEWANDOWSKA a L.M. FALKOWSKA. Parallel measurements of organic and elemental carbon dry (PM_1, $PM_{2.5}$) and wet (rain, snow, mixed) deposition into the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 2016, 104(1-2), 303-312. ISSN 0025326X. Dostupné z: doi:10.1016/j.marpolbul.2016.01.003.

WU, Ch., B. LIU, D. WU et al. Vertical profiling of black carbon and ozone using a multicopter unmanned aerial vehicle (UAV) in urban Shenzhen of South China. *Science of the Total Environment*. 2021, 801. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149689.

WYCHE, K.P., R.L. CORDELL, L. SMITH M et al. The spatio-temporal evolution of black carbon in the North-West European 'air pollution hotspot'. *Atmospheric Environment*. 2020, 243. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117874.

XIANG, J., J. CHEN, G. SOFIA, Y. TIAN a P. TAROLLI. Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environmental Earth Sciences*. 2018, 77(6). Dostupné z: doi:10.1007/s12665-018-7383-9.

ZANATTA, M., M. GYSEL, N. BUKOWIECKI et al. A European aerosol phenomenology-5: Climatology of black carbon optical properties at 9 regional background sites across Europe. *Atmospheric Environment* 2016, 145, 346-364.

ZHANG, G., C. DING, X. JIANG et al. Chemical compositions and sources contribution of atmospheric particles at a typical steel industrial urban site. *Scientific Reports.* 2020, 10, 7654.

ZIOŁA, N., B. BŁASZCZAK a K. KLEJNOWSKI. Long-term eBC measurements with the use of MAAP in the polluted urban atmosphere (Poland). *Atmosphere.* 2021, *12,* 808.