

ZNEČIŠTĚNÍ PŮD V OBLASTI MEZI ZASTÁVKOU U BRNA A OSLAVANY A JEJICH VZTAH K EXPLOATACI UHLÍ

SOIL CONTAMINATION IN THE AREA BETWEEN ZASTÁVKA U BRNA AND OSLAVANY
AND THEIR RELATIONSHIP TO THE EXPLOITATION OF COAL

DAVID BURIÁNEK, VRATISLAV PECINA, MARTIN IVANOV

Abstract

Buriánek, D., Pecina, V., Ivanov, M. (2013): Znečištění půd v oblasti mezi Zastávkou u Brna a Oslavany a jejich vztah k exploataci uhlí – Acta Mus. Moraviae, Sci. geol., 98, 2, 69–82.

Soil contamination in the area between Zastávka u Brna and Oslavany and their relationship to the exploitation of coal

Relatively high concentrations of As (up to 47 ppm), Mo (up to 26 ppm), Hg (up to 1.4 ppm) and S (0.2 wt. %) were found based on the study of the chemical composition of the topsoil (A-horizon). Areas with high concentrations of these elements are located along the western edge the Boskovice Furrow. The areal extent and degree of anthropogenic contamination of the topsoil by several potentially toxic elements As, Mo, Hg and S can be interpreted as result of a combination of long-term coal burning especially in the thermal power plant Oslavany (apparently together with local heating) and dust emissions from coal mining. Chemical composition of power plant slag and ash indicates that a significant holder of contamination (mainly As and Mo) was fly ash; however, high concentrations are also present in airborne dust generated from coal and coal claystone. Deposition of solid particles (ash and coal) were accompanied by aerosols and gaseous emissions.

Key words: Boskovice Furrow, chemical composition, coal, fly ash, slag, topsoil, arsenic, mercury, molybdenum.

David Buriánek¹, Vratislav Pecina¹, Martin Ivanov²

¹ Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 59, Brno; e-mail: david.burianek@geology.cz

² Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Ústav geologických věd, Kotlářská 267/2, 611 37, Brno; e-mail: mivanov@sci.muni.cz

ÚVOD

Počátky těžby černého uhlí v oblasti rosicko-oslavanské pánve se datují již od roku 1760. Byly zde objeveny tři hlavní uhelné sloje o mocnosti až 6 m a celkem zde bylo vytěženo přes 52 556 kt uhlí (JAROŠ 1962; PEŠEK *et al.* 2001). Těžba byla ukončena v roce 1992 (PLCHOVÁ 2002).

Těžba v rosicko-oslavanské pánvi měla zásadní význam pro rozvoj průmyslu na Moravě v devatenáctém a dvacátém století (PLCHOVÁ 2002). Přesto, že uhlí z této oblasti řadu desetiletí představovalo hlavní zdroj energie pro velkou část jižní Moravy, najdeme v literatuře jen málo údajů o jeho chemickém složení. Průměrné chemické složení tohoto uhlí bylo publikováno v práci PEŠKA *et al.* (2010). Tyto údaje ukazují na vysoké obsahy As (220 ppm) a poměrně vysoké jsou obsahy Cr (96 ppm), Ni (55 ppm) a Mo (48 ppm).

Nově byly gamaspektrometricky zjištěny vysoké obsahy U (13–48 ppm, JAKUBOVÁ a LEICHMANN 2010, JAKUBOVÁ 2011) v uhelných jílovcích a pískovcích. Uran je také obsažen ve struskách a popílků, které vznikly spalováním uhlí v oslavanské elektrárně (12–17 ppm; JAKUBOVÁ a LEICHMANN, 2010).

Po celou dobu těžby bylo černé uhlí dominantním palivem na lokálních topeništích i v průmyslu (např. oslavanská elektrárna, výtopny u šachet). Uhelná hmota obsahuje řadu prvků potenciálně nebezpečných pro životní prostředí (PEŠEK *et al.* 2010, JAKUBOVÁ 2011). Během těžby a spalování uhlí se tyto prvky uvolňovaly do atmosféry ať už v podobě plynů, aerosolů nebo prachových částic (např. ČUDIČ *et al.* 2007). Přestože těžba uhlí v rosicko-oslavanské pánvi skončila již před více než dvaceti lety, je okolí Oslavan stále vhodnou oblastí pro studium dopadu spalování uhlí na životní prostředí. Proto jsme se pokusili zjistit, jak tato antropogenní činnost ovlivnila životní prostředí v okolí Oslavan. Pro studium byla zvolena oblast mapového listu Oslavany 24-341. Cílem je identifikovat hlavní polutanty uvolňované během procesu spalování a z těchto polutantů pak vybrat prvky, které jsou dostatečně kontrastní vůči chemickému složení geologického pozadí. U takových prvků pak můžeme sledovat jejich plošné rozšíření v organominerálním A-horizontu půd. Tímto způsobem se můžeme pokusit zhodnotit dopad těžby a zpracování uhlí a možných rizik ve vztahu k životnímu prostředí.

HISTORIE ZNEČIŠTĚNÍ

Uhlí bylo zpočátku využíváno hlavně pro lokální topeniště. V letech 1906–1908 byla u dolu Simson vybudována koksovna. Z plynů koksovny se vyráběl dehet a umělá hnojiva (síran amonný). Koks se přestal vyrábět v roce 1955 (PLCHOVÁ 2002). Důležitým krokem při zpracování uhlí byla výstavba elektrárny Oslavany v letech 1911–1913. Z důvodu útlumu a zastavení dodávek uhlí z rosicko-oslavanského revíru byla v roce 1993 elektrárna zastavena. Krátce nato byla její technologická část a některé stavby zlikvidovány (PLCHOVÁ 1999, KYSELÁK 2002).

Struska a popílek oslavanské elektrárny byly deponovány v blízkém odkališti a na haldách. Tyto objekty jsou situovány několik stovek m v. a sv. od objektu bývalé elektrárny. Nejstarší část struskové haldy (300 až 350 tis. tun materiálu) pochází z let 1913–1924 (stará halda) a dnes je částečně překryta kuželem nové haldy. Ta vznikla po zavedení lanové dráhy v roce 1924. Do roku do roku 1954 sem bylo vyvezeno celkem 1 719 tis. tun škváry (ŠOB 1959). Na novou haldu se ukládala škvára z roštových kotlů, později z granulačních komor a nakonec z tavných komor po práškovém topení. Společně se struskou se vyvážel popílek, který byl asi z 1/3 ukládán na haldu a zbytek se dopravoval vodou na popílkové odkaliště (ŠOB 1959). V současné době je na ploše odkaliště fotovoltaická elektrárna a haldy jsou částečně zarostlé.

GEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA STUDOVANÉHO ÚZEMÍ

Pro studium plošného znečištění byla zvolena oblast omezená územím mapového listu 1 : 25 000 (24-341) Oslavany. Od Z na V zde vystupuje několik geologických jednotek v tomto pořadí: svratecké krystalinikum, moravikum, boskovická brázda, brněnský masiv (BURIÁNEK *et al.* 2011).

Na jihozápadním okraji mapy vystupují migmatity a svory, horniny náležející k svrateckému krystaliniku. V podloží této jednotky vystupuje moravikum obsahující svory, pararuly, kvarcity, mramory, vápenatosilikátové horniny a ortoruly. Plošný rozsah většiny zmíněných hornin je malý, a tak na západním okraji mapy naprosto dominují ortoruly bítešské skupiny.

Boskovická brázda je vyplněna klastickými kontinentálními sedimenty karbonu a permu. Podél východního okraje boskovické brázdy lokálně vystupují horniny moravskoslezského paleozoika (devonské vápence a kulmské droby).

Horniny brněnského masivu tvoří převážnou část v. části listu. Dominují zde biotitické granodiority, které místy přecházejí do amfibol-biotitických granodioritů až tonalitů. Poměrně hojně jsou xenolity metasedimentů a enklávy dioritů až gaber.

Místy jsou horniny zmíněných geologických jednotek překryty neogenními sedimenty, náležejícími ke karpatské předhlubni, nebo kvartérními sedimenty. Neogenní sedimenty jsou reprezentovány výskyty ottangských písků, místy s vložkami štěrků a jílu, spodnobadenské sedimenty jsou zastoupeny jemnozrnnými písky a jíly. Kvartérní sedimenty jsou představeny akumulacemi spraší, písky, štěrky a s vahovými sedimenty.

Z pohledu pedologického dominují v oblasti budované horninami brněnského masivu a moravika kambizemě, zatímco ve sníženině boskovické brázdy a v oblastech pokrytých sprašemi nebo sprašovými hlínami převažují hnědozemě (více viz BURIÁNEK *et al.* 2011).

METODIKA

Pro studium byly využity informace z plošného geochemického mapování ČGS (úkol číslo 390003) a údaje z diplomové práce (PEŠÁK 2010). Tyto údaje byly porovnány s analýzami jemné a hrubé frakce elektrárenské strusky a s typickými horninami boskovické brázdy.

Tvorba map plošné distribuce prvků

Mapování bylo provedeno podle metodiky vypracované pracovní skupinou FOREGS (SALMINEN *et al.* 1998) v měřítku 1 : 25 000. Mapované území bylo rozděleno na čtverce o velikosti 2 × 2 km. Každý čtverec byl charakterizován dvěma odběrovými místy. Na těchto odběrových místech byl po odstranění rostlinných zbytků odebrán kompozitní vzorek svrchního půdního horizontu (tzv. „topsoilu“) z hloubky 0 až 3 cm. Kompozitní vzorek byl připraven kvartováním půdního substrátu odebraného v rozích a ve středu čtverce o hraně 25 m. Na vybraných lokalitách v základním čtverci 2 × 2 km byl odebrán kontrolní kompozitní vzorek půdy z hloubky 15–25 cm. Vzorky hlubšího půdního horizontu jsou v dokumentačním deníku arbitrárně označeny symbolem B. Při odběrech byl brán zřetel na geologickou stavbu území listů tak, aby vzorky půd byly odebrány nad každým více rozšířeným horninovým typem. Vzorky z hlubšího horizontu byly rovněž odebírány tak, aby byl reprezentován každý významnější horninový typ. Celková hmotnost odebíraných půdních vzorků činila cca ½ až 1 kg. Po vysušení v sušičce při teplotě 40 °C byly kompozitní vzorky půd síťovány na plastických sítích. Pro síťování byla použita síťová tkanina o velikosti oka 0,2 mm. Frakce pod 0,2 mm byla dále síťována na analytickou jemnost (< 0,063 mm).

Vzorky půd byly louženy směsí koncentrované HNO₃ a HCl za tepla. Stanovení kovů bylo provedeno podle metodické příručky Centrálních laboratoří České geologické služby (DEMPÍROVÁ a VITKOVÁ 2002).

Hlavní a stopové prvky byly stanoveny následujícími metodami: (1) Cd metodou plamenové atomové adsorbční spektrometrie (FAAS) na spektrometru PE 4000, (2) Cr, Cu, Zn, Mo, Sn, Pb metodou rentgen fluorescenční analýzy (RFA), (3) As hydridovou metodou atomovou adsorbční spektrometrií (HGAAS) s použitím hydridového generátoru HGA 500 a AA spektrometru PE 4000, (4) Hg merkurometricky na přístroji AMA 254, (5) množství celkového uhlíku bylo stanoveno spalováním vzorku na teplotu 1450 °C na přístroji ELTRA CS 500, výstupní CO₂ byl měřen spektrálně v infračervené (IR) oblasti, (6) množství celkové síry (S_{tot}) bylo stanoveno spalováním vzorku při teplotě 1450 °C na přístroji ELTRA CS 500. Množství vzniklého SO₂ bylo stanoveno spektrálně v IR oblasti.

Hodnoty pH/KCl půdních výluhů byly změřeny v analytických laboratořích ČGS pomocí kombinované pH elektrody pHC 2005 na pHmetru PHM 201. Teplotní rozdíl v jednotlivých vzorcích byly automaticky kompenzovány pomocí teplotního kompenzátoru T 201. Kalibrace byla prováděna na standardní pufrů řady IUPAC o hodnotách 4,01 a 7,00. Vzorky půd byly louženy v 10 ml roztoku 1 M KCl za pravidelného protřepávání. Vlastní měření bylo prováděno po 24 hodinách loužení a výsledná hodnota pH/KCl byla odečítána po ustálení potenciálu automaticky s přesností 0,01 jednotky pH.

Analýzy hornin a materiálu odkaliště a struskových hald

Bylo odebráno přibližně 3–5 kg materiálu. Odebrané vzorky byly vysušeny. Popílek byl následně (zhruba 200 g) ručně přesítován (tím byla odstraněna frakce nad 2 mm). Ostatní vzorky byly podrceny. Takto upravený materiál byl rozemlet na analytickou jemnost v planetovém mlýnku. Výsledné vzorky pak byly analyzovány metodou ICP-MS v laboratořích ACME Analytical Laboratories Ltd. Obsahy polutantů v půdě analyzované touto metodou jsou podobné jako výsledky z laboratoří ČGS (viz PEŠÁK 2010, BURIÁNEK *et al.* 2011).

Vyhodnocení dat

Zpracování analytických dat bylo provedeno programem GCDKit (JANOUSEK *et al.* 2006) a programem EXCEL 2000 (Microsoft, USA). Pro statistické zpracování byly podlimitní hodnoty nahrazeny hodnotou 2/5 detekčního limitu.

Koncentrace jednotlivých složek byly vykresleny do map ve formě monoprvkových izoliniových map. Ke zpracování byl použit program SURFER 8 (Golden Software Inc., USA). Pro tvorbu izoliniové mapy byla data převedena do pravidelné sítě (gridu) o vzdálenosti uzlů 500 m metodou krigingu, přičemž pro výpočet uzlových hodnot bylo bráno v úvahu maximálně 10 nejbližších bodů v okolí do vzdálenosti 3 km od uzlu. Hodnoty pro jednotlivé izolinie byly určeny na úrovních detekčního limitu nebo 10% kvantilu (percentilu), dále na úrovních 25%, 50%, 75% a 90% kvantilu (percentilu) a jako poslední byla vyhodnocena kategorie extrémních vzorků podle krabicového diagramu.

VÝSLEDKY

Charakteristika uhelné hmoty a produktů jejího spalování

Kromě průměrné hodnoty chemického složení uhlí (PEŠEK *et al.* 2010) byl pro srovnání použit vzorek z povrchových výchozů uhelné slaje v údolí řeky Oslavy. Jako typický vzorek byl zvolen uhelný lupek z výchozů spodního šedého souvrství nedaleko odvodňovací dědičné štoly.

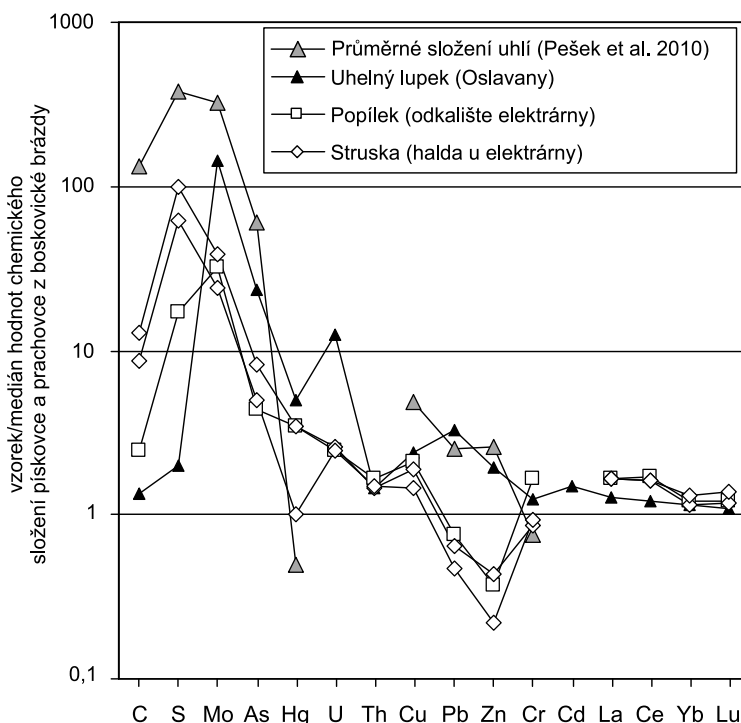
Aby bylo možné charakterizovat produkty spalování uhlí, byla odebrána jemná (zrnitost 1–3 mm) a hrubší frakce (zrnitost kolem 10 mm) strusky z elektrárenské haldy a vzorek elektrárenského popílku z odkaliště (zrnitost pod 2 mm). Tato data byla porovnána s obsahy prvku z typického pískovce a prachovce (padochovské souvrství) z boskovické brázdy (medián hodnot ze dvou vzorků). Zmíněné hodnoty jsou dále v textu označeny jako sedimenty boskovické brázdy a jsou s nimi srovnány ostatní studované vzorky.

Vůči sedimentům boskovické brázdy (obr. 1) má vzorek uhelného lupku vysoké obsahy Mo (22 ppm), As (87 ppm), U (63 ppm), Hg (0,1 ppm), Pb (36 ppm), Zn (105 ppm). Obsahy Mo, As, Cu a Zn (tab. 1, obr. 1) jsou nižší, než jsou průměrné obsahy v uhlí (PEŠEK *et al.* 2010). Zajímavé je, že průměrný vzorek uhlí (PEŠEK *et al.* 2010) má oproti uhelnému lupku poměrně nízké obsahy Hg a Cr (obr. 1). Popílky a strusky mají ve srovnání se sedimenty boskovické brázdy vysoké obsahy Mo (4–6 ppm), As (16–30 ppm), Hg (0,02–0,07 ppm), U (12–13 ppm), avšak mají nižší obsahy Pb (5–8 ppm) a Zn (12–24 ppm).

Tabulka 1. Obsahy vybraných prvků (ppm) v: (1) horninách boskovické brázdy (medián hodnot chemického složení prachovce a pískovce); (2) uhelný lupek, Oslavany; (3) průměrné chemické složení uhlí (PEŠEK *et al.* 2010); (4) popílek z odkaliště; (5-6) struska z haldy u Oslavan.

Table 1. Contents of selected elements (ppm) in the: (1) rocks of the Boskovice Furrow (median values of the chemical composition of siltstone and sandstone); (2) coal shale, Oslavany; (3) the average chemical composition of coals (PEŠEK *et al.*, 2010); (4) ash from pond; (5-6) slag heap near Oslavany.

číslo vz.	1	2	3	4	5	6
Mo	0,15	21,5	48	4,8	5,8	3,6
As	3,65	86,7	220	15,9	30	18,4
Hg	0,02	0,10	0,01	0,07	0,07	0,02
U	5,0	62,5	-	12,4	13,0	12,4
Th	13,6	19,8	-	22,8	19,9	20,3
Cu	17,8	42,9	86	37,6	33,5	25,6
Pb	10,8	35,6	27,0	8,1	7,0	5,1
Zn	54,5	105,0	140,0	20,0	24,0	12,0
Cr	126,6	157,4	96,0	212,1	109,5	116,3
Cd	0,2	0,3	-	< 0,1	< 0,1	< 0,1
La	31,15	39,9	-	51,8	51,1	52
Ce	65,1	79,1	-	110,3	104,2	104,4
Yb	3,57	4,15	-	4,36	4,06	4,66
Lu	0,49	0,54	-	0,59	0,58	0,67



Obr. 1. Obsahy vybraných prvků v uhelném lupku, struskách a popílcích Oslavanské elektrárny normalizované mediánem hodnot chemického složení prachovce a pískovce z boskovické brázdy.

Fig. 1. Contents of selected elements in the coal shale slags and ashes from thermal power plant Oslavany normalized by median values of the chemical composition of siltstone and sandstone from the Boskovice Furrow.

Uhelný lupek má podobné obsahy Cd jako okolní sedimenty boskovické brázdy (0,3 vs. 0,2 ppm). Strusky a popílky mají obsahy tohoto prvku pod 0,1 ppm. Všechny popisované materiály (horniny boskovické brázdy i strusky a popílky) mají podobné obsahy Cr (96–212 ppm) a REE (např. Yb 4–5 ppm). Tyto prvky jsou často vázány v akcesorických minerálech (např. zirkon, monazit, spinelidy), a proto jsou při zvětrávání i při spalování poměrně málo mobilní.

Z těchto údajů vyplývá, že největší kontrast mezi antropogenním znečištěním a geologickým podložím můžeme očekávat u Mo a As. Vysoké obsahy těchto prvků jsou zároveň v uhelných lupcích, jejichž plošné rozšíření na povrchu je však malé, a proto by se při plošném mapování organominerálního A-horizontu neměly výrazně projevit (pokud nebyl v dané oblasti využit haldový materiál pro úpravu starých cest a pro zásyp terénních nerovností).

Další možné zdroje znečištění

Oblast s nejvyššími hodnotami znečištění je lokalizována podél západního okraje deprese Boskovické brázdy. V této oblasti probíhala v minulosti intenzivní těžba v řadě důlních děl (například bývalý důl Kukla, Simson a Ferdinand). Při těžbě a zpracování uhlí se uvolňovalo velké množství prachových částic, které se na popisovaném znečištění mohly podílet. Uhlí a uhelné lupky totiž mají dokonce vyšší obsahy As než popílky (obr. 1) a uhelný lupek má také poměrně vysoké obsahy Hg. S těžbou pak také bylo spojeno dlouhodobé spalování uhlí a již přímo na dole nebo v sídlištích na důl navázaných (Padochov, Zbýšov, Babice u Rosic).

Korelace mezi obsahy prvků v půdním horizontu A

Výsledky studia korelací mezi proměnnými ve svrchní vrstvě půdy v oblasti listu Oslavany jsou vyjádřeny v hodnotách korelačních Spearmanových koeficientů vypočtených programem GCDkit (JANOUBEK *et al.* 2006). Význam korelací mezi jednotlivými prvky vyznačen velikostí čísla a jeho hodnotou (obr. 2).

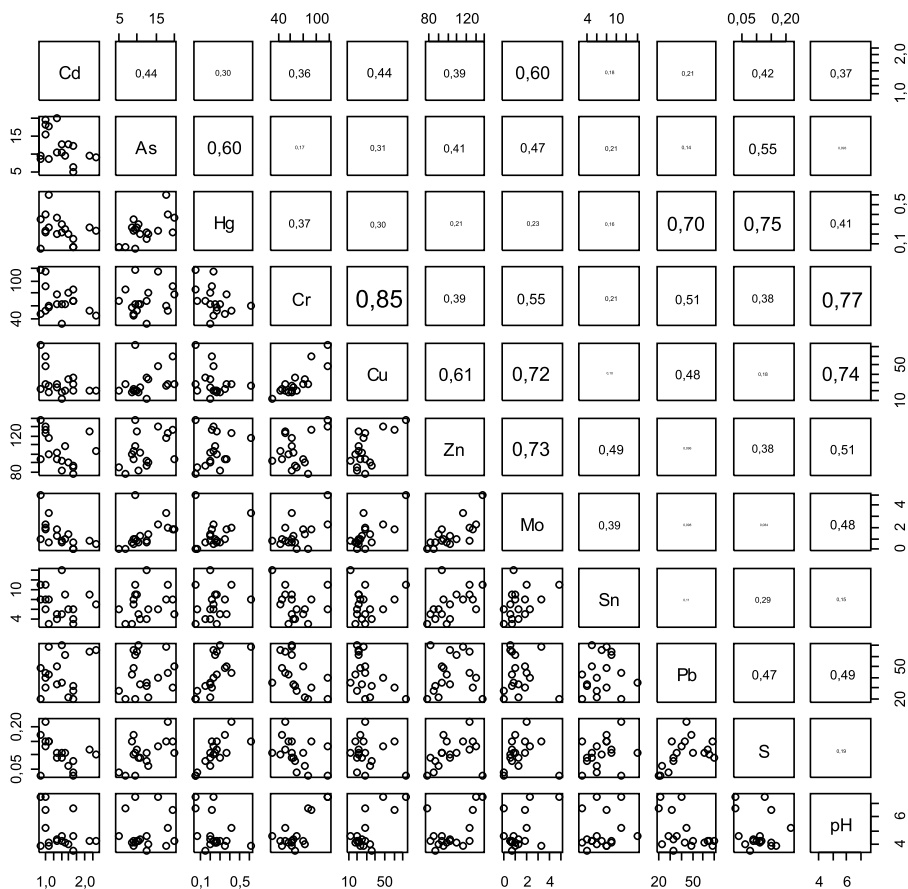
V souboru dat z půdního horizontu A spolu významně korelují obsahy Cr-Cu-Mo-Cd-Zn-pH, druhou významnou skupinu představují Hg-Pb-S a poslední skupinu prvků s významnou korelací reprezentuje As-Hg. Tyto korelace naznačují, že distribuce prvků jako je Cr a Cu v půdním horizontu A může být výrazně ovlivněna hodnotou pH v půdě. Prvky jako je Hg a Pb mohou být vázány na sloučeniny síry. Na druhou stranu As se jeví jako polutant, který je jen málo závislý na hodnotách pH v půdě.

Plošná distribuce polutantů

Na základě predešlých údajů byly zvoleny jako nevhodnější prvky pro charakteristiku znečištění As a Hg a jejich plošná distribuce byla srovnávána s obsahy S_{tot} a hodnotami pH (obr. 3). Poměrně kontrastní obsahy Mo jsou z tohoto hlediska méně výhodné, protože jsou více závislé na hodnotách pH.

Vyšší obsahy As tvoří plošně rozsáhlou anomální oblast v z. polovině studovaného území s maximálními hodnotami 19 až 47 ppm As. Tato oblast je vázána převážně na horniny bitešské skupiny (obsahy As v ortorulách jsou obvykle pod 0,5 ppm, BURIÁNEK *et al.* 2011) a horniny boskovické brázdy. Na území budovaném horninami západní granodioritové oblasti brněnského masivu jsou zvýšené obsahy As těsně nad hranicí mediánu a podstatná část tohoto území vykazuje obsahy pod jeho hranici.

Plošná distribuce obsahů Hg ve svrchní vrstvě půdy tvoří dvě plošně rozsáhlejší anomální oblasti vázané převážně na sedimentární horniny boskovické brázdy a částečně zasahují do oblasti tvořené horninami bitešské skupiny. V každé této oblasti na několika odběrových místech přesahují hodnoty obsahů rtuti 0,5 ppm. Obě oblasti zvýšených obsahů Hg korespondují s oblastmi zvýšených obsahů As a částečně S_{tot} . Také charakter distribuce Hg odpovídá distribuci As a S_{tot} . Ve v. polovině studované oblasti tvořené



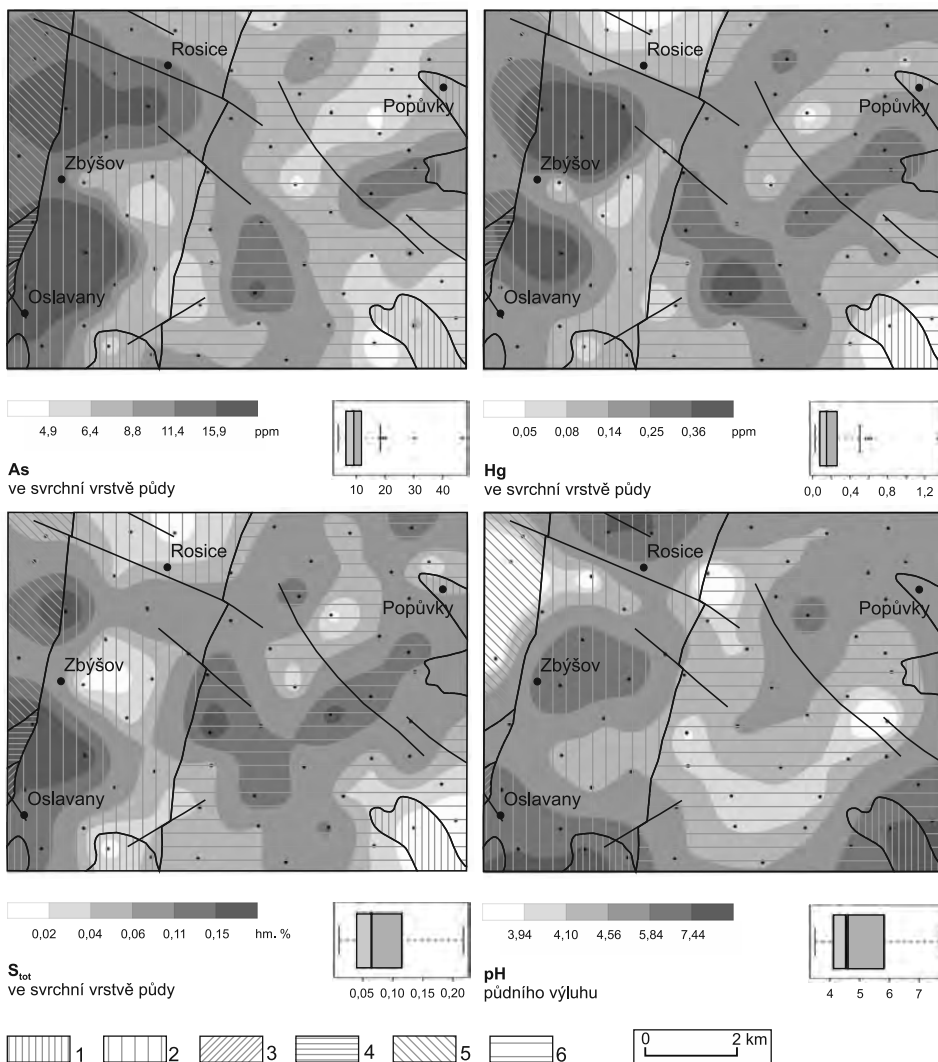
Obr. 2. Korelační matice (Spearmanovy koeficienty korelace) pro vybrané prvky ze svrchní vrstvy půdy (horizont A) v oblasti mapového listu Oslavany (Počet vzorků: 59).

Fig. 2. Correlation matrix (Spearman coefficients of correlation) for selected elements from topsoil (A horizon) in the area of map sheet Oslavany (number of samples: 59).

horninami západní granodioritové oblasti brněnského masivu se obsahy Hg pohybují okolo hodnot mediánu s několika málo minimy a maximy.

Hodnoty pH/KCl vyšší než průměrná hodnota jsou vázány na paleozoické horniny boskovické brázd, neogenní a kvartérní sedimenty. Naproti tomu v oblastech tvořených metamorfovanými nebo vyvřelými a metamorfovanými horninami brněnského masivu a moravika jsou hodnoty pH/KCl pod průměrnou hodnotou.

Mapa izolinií obsahu S_{tot} ve svrchní části půdního horizontu vykresluje S-J orientovanou oblast snížených obsahů s třemi oddělenými minimy v z. části listu. Tato oblast je vázána na sedimentární horniny boskovické brázd. Výrazná a plošně rozsáhlejší je rovněž oblast v jv. rohu mapy tvořená sedimentárními horninami karpatské předhlubně. Tato oblast velmi dobře koresponduje s nízkými obsahy As, Hg a Mo. Mírně zvýšené obsahy S_{tot} oproti místnímu pozadí je možné sledovat ve v. polovině listu na území budovaném převážně horninami západní granodioritové oblasti brněnského masivu. Ale zároveň se v této oblasti vyskytují ojedinělé velmi nízké obsahy S_{tot} . Při z. okraji listu je plošně rozsáhlejší pozitivní anomální oblast vázaná na okraj boskovické brázd. Při porovnání mapy obsahů S a prostorové distribuce pH je zřejmé, že zvýšené obsahy S_{tot} jsou



Obr. 3. Mapy izolinií koncentrací vybraných polutantů (As, Hg, S) a pH na listu 1 : 25 000 (Oslavany). Distribuce hodnot jsou znázorněny v krabicových diagramech. Jsou zde zobrazeny hodnoty mediánu, hodnoty 25% a 75% kvantilů (obdélníky) pro soubor z dané mapy. Mimo hranaté závorky jsou prázdnými kolečky naznačeny odlehle hodnoty. Černé body označují místa odběrů vzorků. 1 - karpatská předhlubeň, 2 - paleozoikum, boskovická brázda, 3 - svratecké krystalinikum, 4 - moravikum, olešnická skupina, 5 - moravikum, bitešská skupina, 6 - brněnský masiv, západní granodioritová oblast.

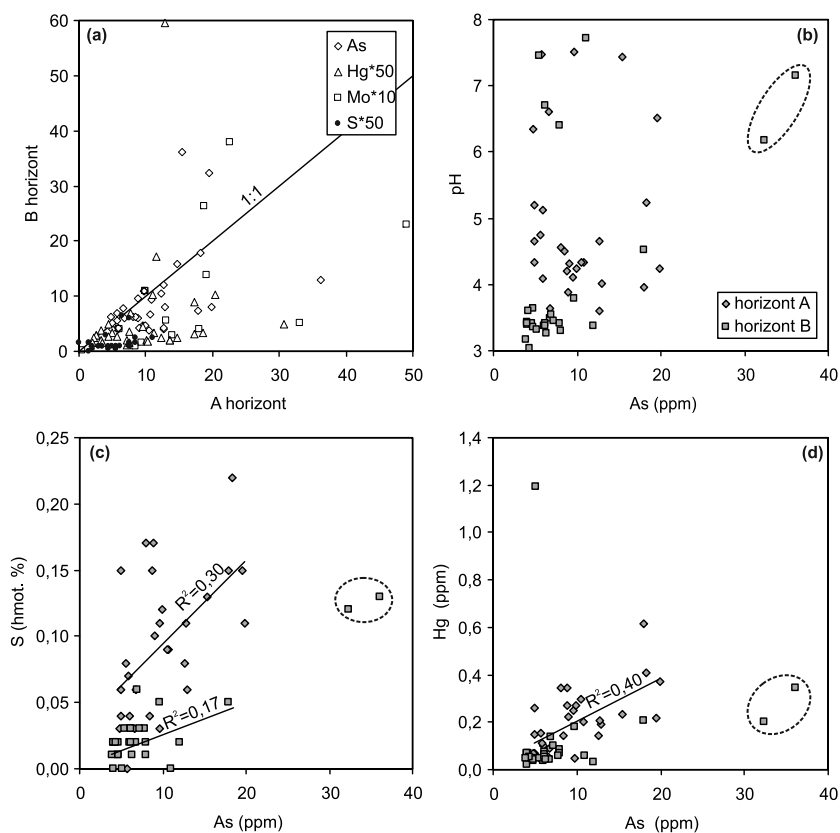
Fig. 3. Isoline maps of concentrations of selected pollutants (As, Hg, S) and pH on sheet 1 : 25 000 (Oslavany). There are displays the median value, a value of 25% and 75% percentiles (bars) for the file from the map. Outside the square brackets are empty wheels indicating outliers. A box and whisker diagram illustrates the distribution of values in the data set. Black dots indicate the sampling site. 1 - Carpathian Foredeep, 2 - Paleozoic, Boskovicke Furrow, 3 - Svratka Crystalline Unit, 4 - Moravicum, Olešnice Group, 5 - Moravicum, Bitešská Group, 6 - Brno Massif, Western Granodiorite Area.

většinou v oblastech s nízkým pH. Síra se vyskytuje při nižším oxidačně-redukčním potenciálu ve formě sulfidů (oxidační stupeň II), při lepším přístupu kyslíku v podobě síranů (oxidační stupeň VI). pH a obsahy S jsou pravděpodobně odrazem nejen složení podloží (zásaditost spraší, vápnitých sedimentů permokarbonské), ale i využití půdy, přičemž nižší pH se vyskytuje v lesnatých oblastech, vyšší v oblastech zemědělsky obhospodařovaných (obr. 3).

Srovnání obsahů vybraných prvků v půdním horizontu A a B

Z předešlého textu vyplývá, že znečištění As, Hg a Mo na západním okraji boskovické brázdy je pravděpodobně antropogenního původu. Pro ověření této hypotézy byly porovnávány obsahy zmíněných prvků v povrchovém půdním horizontu A a pod-povrchovém horizontu B (obr. 4a).

Ve svrchním horizontu (A) se koncentrují pevné částice transportované vzduchem nebo srážkami. Zároveň však v tomto horizontu v důsledku biologické činnosti půdního



Obr. 4. Chemické složení půdních horizontů A a B: (a) diagram pro obsahy As, Hg*50, Mo*10 a S*50 v půdních horizontech A a B, (b) diagram As vs. pH, (c) diagram As vs. S, (d) diagram As vs. Hg. Přerušovaná čára označuje odlehlé hodnoty. Plné přímky v diagramech (c), (d) reprezentují spojnicí trendu a v diagramu (a) znázorňuje přímku hodnotu 1:1).

Fig. 4. Chemical composition of soil horizons A and B: (a) diagram of the content As, Hg*50, Mo*10 and S*50 in the soil horizons A and B, (b) plot As vs. pH, (c) plot As vs. S, (d) plot As vs. Hg. The dashed line indicates outliers. Full lines in diagrams (c), (d) represents the trendline and in the diagram (a) shows straight line 1:1).

edafonu probíhá intenzivní humifikace doprovázená tvorbou huminových kyselin (HK) a fulvokyselin (FK). Přítomnost HK a FK často přispívá ke zvyšující se aciditě prostředí a také snadnějšímu zvětrávání a dezintegraci anorganických složek. Některé polutanty tedy mohou ve formě roztoků snadno migrovat do nižších půdních horizontů.

Horizont B naopak reprezentuje zvětralou matečnou horninu často modifikovanou vnitropůdním zvětráváním, kde je již velká část primárních minerálů přeměněna na směs jílových minerálů, oxidů a hydroxidů železa a podobně. V tomto horizontu jsou hromaděny vyluhované látky z horizontu A (hlavně trojmocné železo a půdní koloidy). Po chemické stránce si tento horizont zachovává řadu vlastností podloží, avšak na druhou stranu se mohou na sekundární minerály sorbovat mnohé látky, které byly vodnými roztoky transportovány z povrchu.

Půdy mají většinou mírně kyselý až kyselý charakter (tab. 2). Při stejném rozsahu pH/KCl od 3 do 7,7 pro svrchní i spodní půdní horizont (A, B) odpovídá hodnota mediánu ve svrchním horizontu kyselé reakci (pH/KCl = 4,56), ve spodním horizontu reakci silně kyselé (pH/KCl = 3,43) (tab. 2). Alkalická půdní reakce (pH/KCl > 7,2) ve svrchním horizontu byla zjištěna pouze na několika odběrových místech. Obsahy S_{tot} v horizontu A výrazně převyšují její obsahy v hlubším srovnávacím půdním horizontu B (obr. 4c). Koncentrace Hg (obr. 4d) ve svrchní části půdního profilu je výrazně vyšší (medián 0,14 ppm) oproti obsahům Hg ve spodním půdním horizontu (medián 0,06 ppm). Přitom rozsahy hodnot jsou podobné při podobném rozsahu od 0,03, resp. 0,02 do 1,35, resp. 1,19 ve svrchním, resp. spodním horizontu. Průměrný podíl obsahů v horizontu A a B je kolem 3,5 což ukazuje na výrazné antropogenní ovlivnění (DE Vos a TARVAINEK 2006) velké části studovaného území. Výjimku tvoří dva vzorky, u nichž se nepodařilo zjistit původ znečištění (v jednom případě se pravděpodobně jedná o vzorek v říční nivě řeky Oslavy a v druhém o půdy na spráších uprostřed bukového lesa). Také obsahy As jsou v půdním horizontu A vyšší, nebo stejné jako v horizontu B (tab. 2). Opět to neplatí pouze pro dva vzorky, z nichž jeden pochází z oblasti, kde bylo těženo a zpracováváno uhlí (Oslavy-Vinohrady) a druhý opět z údolí Oslavy. Velmi podobně se chová také Mo, kde jsou ve studovaném souboru pouze dva vzorky s vyššími obsahy v horizontu B než v horizontu A (jedná se o stejné vzorky jako v případě As).

Tabulka 2. Hlavní statistické charakteristiky hodnot pH, S_{tot} a stopových prvků v půdním horizontu A (počet vzorků: 59) a B (počet vzorků: 28) na mapovém listu 1 : 25000 Oslavy.

Table 2. Main statistical characteristics of values of pH, S_{tot} and trace elements in the soil horizon A (number of samples: 59) and B (number of samples: 28) on the map sheet 1 : 25000 Oslavy.

	pH/KCl	As (ppm)	Cd (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Hg (ppm)	Mo (ppm)	Pb (ppm)	S_{tot} (hm. %)	Zn (ppm)
A-horizont										
min	3,5	3,7	0,8	31,7	11,3	0,03	0,02	18,3	0,01	56,5
10%	3,9	4,9	1,1	45,2	14,0	0,05	0,02	20,6	0,02	73,7
25%	4,1	6,4	1,4	52,6	19,5	0,08	0,02	25,7	0,04	84,5
50%	4,6	8,8	1,6	66,0	26,3	0,14	0,32	34,7	0,06	93,7
75%	5,8	11,4	1,8	86,0	34,5	0,25	1,14	51,7	0,11	113,0
90%	7,4	15,9	2,1	99,3	48,6	0,36	2,29	68,5	0,15	131,1
max	7,7	46,9	5,3	129,4	104,7	1,35	25,83	92,9	0,22	232,5
B-horizont										
min	3,0	3,9	0,9	21,4	13,0	0,02	0,02	13,4	0,01	54,5
10%	3,3	4,1	1,1	51,8	17,3	0,04	0,02	16,9	0,01	68,3
25%	3,4	4,7	1,5	57,8	19,2	0,05	0,02	19,2	0,01	76,4
50%	3,4	6,2	1,7	66,1	24,8	0,06	0,02	22,8	0,02	91,9
75%	4,0	8,0	1,9	84,4	34,7	0,09	0,11	27,9	0,03	102,2
90%	6,8	13,8	2,1	103,9	52,0	0,20	1,66	37,4	0,05	125,4
max	7,7	36,2	2,5	124,5	90,1	1,19	3,80	46,6	0,13	166,6

DISKUSE

Charakter zdroje znečištění

Při spalování uhlí se uvolňují zejména oxid uhličitý, oxidy dusíku, oxid uhelnatý, oxidy síry, pevné částice, halogeny a těžké kovy (NOSKIEVIČ 1993). Množství těchto produktů závisí na chemickém složení paliva a intenzitě a účinnosti spalování.

Uhlí z rosicko-oslavanského uhelného revíru obsahuje 9–50 hm. % (průměr 23 hm. %) popelovin (PEŠEK *et al.* 2001). Hlavními zdroji popelovin v uhlí jsou jílové minerály, křemen, pyrit/markazit, kalcit, siderit a dolomit (BOUŠKA 1977). Řada stopových prvků, zejména těžké kovy, jsou vázány přímo v organické hmotě nebo v akcesorických minerálech. Další prvky, jako třeba uran, se mohou koncentrovat v sekundárních minerálech jako je limonit (JAKUBOVÁ a LEICHMANN 2010). Produktem hoření uhlí v Oslavanské elektrárně byla struska a popel. Obě tyto složky tvořilo hlavně sklo. Jak zjistili Jakubová a Leichmann (2010), je například uran v tomto sklu distribuován poměrně homogenně. Stejní autoři také uvádějí, že ve strusce byly zjištěny spinelidy, silikáty, sulfidy a fosfidy železa, které jsou rozmístěny nerovnoměrně. Dominantní sklo tedy představuje materiál, v němž do určité míry docházelo k homogenizaci neprchavých komponent z uhelné hmoty. Drobné částice popílku byly původně také tvořeny hlavně sklem, avšak dnes je tento materiál patrně z velké části nahrazen sekundárními minerály (chlority a podobně). Sklo je totiž v půdním prostředí náchylné na devitrifikaci (odskelnění), což však nemusí platit pro některé minerály, které obsahovalo (např. spinelidy).

Těžké kovy v uhlí můžeme rozdělit podle jejich distribuce v produktech spalování. Během spalování se mohou vázat v popelu a strusce na topeništi, v úletovém popílku, v aerosolu či v plynných emisích. Většina autorů (například YAN *et al.* 2001, RITZ *et al.* 2003) považuje As za prvek, který je výrazně vázán v úletovém popílku, zatímco Hg je typickým prvkem vázaným na plynné emise. V plynných emisích se může nacházet 70 až 95 % celkové Hg z uhlí (GERMANI a ZOLLER 1988, KLIKA *et al.* 2001). Obsah As v úletovém popílku je často až několiknásobný oproti strusce a popílku, které zůstávají v topeništi (např. RITZ *et al.* 2005). Podle tohoto autora při spalování uhlí těkavost Hg a As klesala s klesajícím obsahem S v uhlí. To však patrně neplatí pro popisovaný případ, protože uhlí z rosicko-oslavanského uhelného revíru patří mezi málo prchavá uhlí až antracit a mělo vysoký obsah S 0,4 až 6,8 hm. % (PEŠEK *et al.* 2001). Uhelný lupek a uhlí ve srovnání se struskami a popílky obsahují vyšší obsahy většiny sledovaných polutantů kromě Cr a Th. Část As a především Hg tedy patrně byla transportována v podobě plynných exhalací nebo aerosolů a do půdy se dostala společně s dešťovými srážkami.

Uhelný prach se mohl do ovzduší uvolňovat při třídění uhlí i při jeho dalším zpracování (doprava, výroba dehtu nebo koksů). Nemůžeme také zanedbat deflaci uhelného prachu a uhelných lupků z haldového materiálu. Vzhledem k vysokým obsahům sledovaných prvků v uhlí a uhelných lupcích může být také tento zdroj poměrně důležitý. Bohužel nelze jednoznačně určit podíl obou zdrojů na výsledném znečištění. Protože je patrná shodná pozice hlavních center dolování a kladných anomálií studovaného znečištění, můžeme předpokládat, že jde o poměrně významný zdroj znečištění.

Chování polutantů v půdním horizontu

Kromě několika anomálních vzorků, které patrně vždy souvisejí s antropogenním znečištěním horizontu B, je z obrázku 4a patrné, že znečištění je vázáno hlavně ve svrchní vrstvě půdy (obsahy studovaných prvků jsou v horizontu A podstatně vyšší než v horizontu B). Toto zjištění také podporuje skutečnost, že zmíněné vzorky se zvýšeným obsahem As v horizontu B jsou v celém souboru dat anomální (například mají také zvýšené obsahy S nebo Hg; obr. 4b–d).

Z diagramu na obrázku 4b je patrné, že obsahy As nejsou závislé na hodnotě půdního pH. Stejně obsahy As můžeme objevit v kyselých i zásaditých půdách, proměnlivé však

zřejmě bude mocenství. Ve většině prostředí se mobilní forma As^{5+} obvykle vyskytuje v podobě dihydrogenarseničnanového aniontu H_2AsO_4^- ; v kyselém prostředí s nízkým Eh se redukována forma As^{3+} vyskytuje jako H_3AsO_3^0 . Migrace As v půdním prostředí je velmi omezená vzhledem k rychlé sorpci na jílové minerály, organickou složku a hydratované oxidy Fe (goethit) a Al (REIMANN *et al.* 2009).

Přitom hodnoty pH v horizontu A a B mají vzájemně velmi dobrou pozitivní korelaci, kterou můžeme vyjádřit hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0,88$, přičemž hodnota spolehlivosti (koeficient determinace R^2) udává, jaký podíl rozptylu ve studovaných závislé proměnných se podařilo vysvětlit regresní rovnicí (čím blíže k 1, tím je větší úspěšnost regrese). Zvýšené obsahy S_{tot} slabě pozitivně korelují s As, a to v horizontu A poněkud více ($R^2 = 0,3$), než v horizontu B ($R^2 = 0,2$; obr. 4c). Z grafu (obr. 4c) je také patrné, že u většiny studovaných lokalit je As polutantem, který se do půdy dostal z atmosféry, protože jeho obsahy v horizontu B jsou většinou nízké a zvýšenému obsahu As neodpovídá adekvátně zvýšený obsah S_{tot} . Mezi obsahem Hg a As v půdním horizontu A existuje slabá pozitivní korelace ($R^2 = 0,4$), zatím co v půdním horizontu B je korelace statisticky nevýznamná. Prvky jako je As, Hg, Mo a S tedy nebyly v průběhu předchozích let výrazně mobilizovány a nemigrovaly do horizontu B, což opět naznačuje, že zvýšené obsahy obou prvků v tomto horizontu souvisejí s depozicí hlavně pevných částic z atmosférických exhalací.

Závažnost a charakter znečištění

Plošné rozšíření anomálií As, Hg, S a Pb nerespektuje geologické hranice, což naznačuje, že by mohly mít antropogenní původ. Anomálie jsou koncentrovány podél západního okraje boskovické brázd (obr. 3). Toto zjištění poměrně dobře koresponduje s předpokladem, že prachové částice uvolněné při spalování uhlí byly (hlavně v zimním období) transportovány převažujícími větry jihovýchodního směru (PODHRÁZSKÁ a DUŠKOVÁ 2005). Toto proudění však výrazně ovlivnila morfologie deprese Boskovické brázd protažené ve směru SSV-JJZ. Poměrně významné jsou zde také větry severozápadního až západního směru, které mohly ovlivnit vznik drobných kladných anomálií As a Hg východně od boskovické brázd (obr. 3).

Kromě materiálu z uvolněného při spalování uhlí v oslavanské elektrárně se na znečištění mohly podílet také jiné zdroje (lokální vytápění v obcích, uhelný prach spojený s těžbou uhlí). Sedimentace částic popílku a prachu pak patrně přednostně probíhala na elevacích ohraničujících západní okraj boskovické brázd. Nejvýznamnější anomálie As, Hg a S se nacházejí severně od Oslavan a severně od Zbýšova (obr. 3). V obou případech jde o oblasti poblíž míst kde probíhala těžba a zpracování uhlí (hlavně spalování).

Zjištěné hodnoty v rozmezí mezi 30 až 47 ppm pro As, 0,4 až 1,4 ppm pro Hg a 80 až 93 ppm pro Pb se podle Metodického pokynu MŽP ze dne 3. 7. 1996 (tato norma již dnes není platná, avšak prozatím nebyly stanoveny nové limitní hodnoty) posuzují jako znečištění životního prostředí vyjma oblastí s přirozeným vyšším obsahem sledovaných látek. Žádná ze zmíněných látek však nepřekračuje limity pro kategorii B (znečištění, které může mít negativní vliv na zdraví člověka).

ZÁVĚRY

Na základě studia chemického složení povrchové vrstvy půd byly zjištěny koncentrace As (až 47 ppm) hlavně podél západního okraje boskovické brázd. S výskytem tohoto prvku poměrně dobře koreluje distribuce Mo (až 26 ppm), Hg (až 1,4 ppm) a S (0,2 hm. %). Toto znečištění dnes nepředstavuje závažnější hrozbu pro obyvatelstvo, avšak dokládá, jak významný vliv měla těžba a zpracování černého uhlí na kvalitu životního prostředí v okolí Oslavan. Dnešní rozsah pozitivních anomálií As, Mo, Hg a S je důsledkem kombinace dlouhodobého spalování černého uhlí zejména v Oslavanské elektrárně, popřípadě

v lokálních topeništích souvisejících s těžbou (např. doly), a kontaminace prachovými částicemi uvolněnými při těžbě a zpracování uhlí. Chemické složení elektrárenských strusek, uhlí a uhelných lupků potvrzuje významný podíl prachových částic na rozsahu a charakteru znečištění. Pevné částice uhelného prachu a popílku však byly doprovázeny aerosoly a plynnými exhalacemi. Toto znečištění se koncentrovalo hlavně v povrchové vrstvě půdy.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují P. Hršelové a anonymnímu recenzentovi za kritické pročtení rukopisu. Práce byla vypracována s finanční podporou projektu ČGS 390003 (Základní geologické mapování Brněnské aglomerace v měřítku 1 : 25 000).

LITERATURA

- BOUŠKA, V. 1977: Geochemie uhlí. – Academia. 207 s., Praha.
- BURIÁNEK, D., BUBÍK, M., FRANCŮ, J., FŮRYCHOVÁ, P., HAVLÍN, A., GLÍKOVÁ, H., JANDERKOVÁ, J., KONEČNÝ, F., KREJČÍ, Z., KRUMLOVÁ, H., KRYŠTOFOVÁ, E., KUNCEOVÁ, E., MÜLLER, P., OTAVA, J., PALEČEK, M., PECINA, V., POUL, I., SEDLAČEK, J., SKÁCELOVÁ, Z., ŠRÁMEK, J., TOMANOVÁ PETROVÁ, P., VERNER, K., VEČEŘA, J., VÍT, J. (2011): Vysvětlivky k základní geologické mapě České republiky 1 : 25 000 list 24-341 Oslavany. – MS, Česká geologická služba, Praha.
- ČUDIČ, V., KISIČ, D., STOJILJKOV D., JOVIOVIĆ A. 2007: Ash from thermal power plants as secondary raw material. – *Arch. Ind. Hyg. Toxicol.*, 58: 233–238.
- DEMPÍROVÁ, L., VÍTKOVÁ, H. 2002: Metodická příručka. – MS, Česká geologická služba, Centrální laboratoř, Praha.
- DE VOS, W., TARVAINEN, T. (eds.) 2006: Geochemical atlas of Europe. Part 2: Interpretation of geochemical maps, additional tables, figures, maps and related publications. – FOREGS atlas. – *Geological Survey of Finland*, 690 s., Espoo.
- GERMANI, M. S., ZOLLER, W. H. 1988: Vapor-phase concentrations of arsenic, selenium, bromine, iodine and mercury in the stack of coal-fired power plant. – *Env. Sci. Tech.*, 22, 1079–1085.
- JAKUBOVÁ, P., LEICHMANN, J. 2010: Gamaspektrometrická charakteristika uhelných sedimentů boskovické brázdý a strusek vzniklých jejich spalováním. – *Geol. výzk. Mor. Slez.*, 17, 1–2, 183–186.
- JAKUBOVÁ, P. 2011: Charakteristika uranové anomalie v jižní části boskovické brázdý. – *Diplomová práce*. Masarykova univerzita. Brno.
- JANOUSEK, V., FARROW, C. M., ERBAN, V. 2006: Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). – *J. Petrol.*, 47, 6, 1255–1259.
- JAROŠ, J. 1962: Geologický vývoj a stavba Boskovické brázdý. – *Disertační práce*, Univerzita Karlova, Praha.
- KLIKA, Z., BARTOŇOVÁ, L., SPEARS, D. A. 2001: Effect of boiler output on trace element partitioning during coal combustion in two fluidised-bed power stations. – *Fuel*, (80), 907–917.
- KYSELÁK, J. 2002: Elektrárna Oslavany. – Vlastivědný spolek Rosicko-Oslavanska, 156 s, Oslavany.
- NOSKIEVIČ, P. 1993: Spalování uhlí. – Skriptum, 1. vyd., Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 62 s., Ostrava.
- PEŠÁK, L. 2010: Pedologické poměry vybraných regionů Oslavanska. – *Diplomová práce*, Masarykova univerzita. Brno.
- PEŠEK, J., HOLUB, V., JAROŠ, J., MALÝ, L., MARTÍNEK, K., PROUZA, V., SPUDIL, J., TÁSLER, R. 2001: Geologie a ložiska svrchnopaleozoických limnických pánví České republiky. – Český geologický ústav, 244 s., Praha.
- PEŠEK, J., SÝKOROVÁ, I., JELÍNEK, E., MICHNA, O., FORSTOVÁ, J., MARTÍNEK, K., VAŠÍČEK, M., HAVELCOVÁ, M. 2010: Major and minor elements in the hard coal From the Czech Upper Paleozoic Basins. – *Czech Geological Survey, Special Paper*, 40 s., Praha.
- PLCHOVÁ, J. 1999: Rosicko-oslavanský uhelný revír 1760–1999. – 62 s., Město Oslavany.
- PLCHOVÁ, J. 2002: Rosicko-oslavanská černouhelná pánev v datech. – Vlast. spolek Rosicko-Oslavanska, 258 s., Oslavany.
- PODHRAZSKÁ, J., DUFRKOVÁ, J. 2005: Protierozní ochrana půdy. – *Skriptum*, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 99 s., Brno.
- REIMANN, C., MATSCHULLAT, J., BIRKE, M., SALMINEN, R. 2009: Arsenic distribution in the environment: The effects of scale. – *Applied Geochemistry*, 24, 1147–1167.

- RITZ, M., JUREČKA, P., KLIKA, Z., CHALUPA, V., MOHYLA, D., ŠTEFANIDESOVÁ, V. 2005: Produkty spalování tuhých paliv v malých domácích topeništích. - *Sbor. věd. prací Vys. šk. báň. v Ostravě, Ř. horn. geol.*, 2005, 51, 1, 55-68.
- RITZ, M., BARTOŇOVÁ, L., KLIKA, Z. 2003: Emise těžkých kovů a polyaromatických uhlovodíků při spalování uhlí v průmyslových a malých topeništích. - *Sbor. věd. prací Vys. šk. báň. v Ostravě, Ř. horn. geol.*, 49, 69-82.
- SALMINEN, R., TARVAINEN, T., DEMETRIADES, A., ĎURIŠ, M., FORDYCE, F. M., GREGORAUSKIENE, V., KAHELIN, H., KIVISILLA, J., KLAVER, G., KLEIN, H., LARSON, J. O., LIS, J., LOCUTURA, J., MARSINA, K., MJARTANOVA, H., MOUVET, C., OCONNOR, P., ODOR, L., OTTONELLO, G., PAUKOLA, T., PLANT, J. A., REIMANN, C., SCHERMANN, O., SIEWERS, U., STEENFELT, A., VAN DER SLUYS, J., DEVIVO, B., WILLIAMS, L. 1998: FOREGS geochemical mapping field manual, Espoo, Finland, Geological Survey of Finland.
- ŠOB, A. 1959: Průzkum haldy 1959, Oslavany. - *MS*, GP Brno.
- YAN, R., GAUTHIER, D., FLAMANT, G. 2001: Volatility and chemistry of trace elements in a coal combustor. - *Fuel*, 80, 2217-2226.