

ZHODNOCENÍ GEOENVIRONMENTÁLNÍHO RIZIKA MATERIÁLU NA HALDĚ BÝVALÉ ELEKTRÁRNY V OSLAVANECH

EVALUATION OF GEOENVIRONMENTAL RISK OF MATERIAL ON THE HEAP OF THE FORMER
POWER STATION IN OSLAVANY

JANETTA HALÍKOVÁ & JINDŘICH ŠTELCL

Abstract

Halíková, J., Štelcl, J., 2017: Zhodnocení geoenvironmentálního rizika materiálu na haldě bývalé elektrárny v Oslavanech. – *Acta Mus. Morav., Sci. Geol.*, 102, 1-2, 67-77.

Evaluation of geoenvironmental risk of material on the heap of the former power station in Oslavany

The aim of this thesis is geoenvironmental risk evaluation of material which was long term stored on the heap in Oslavany as a remain of coal combustion. The first part consists of a brief summary of the newest knowledge on this topic, followed by methods used in this research, namely radioactivity study, granulometry and XRD, XRF, electron microscopy and EDX analysis. Its results suggest there is no geoenvironmental risk caused by the material.

Key words: Oslavany, coal combustion, furnace, fly ash, pollutants, radioactivity.

Janetta Halíková: Institute of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic, e-mail: 408505@mail.muni.cz

Jindřich Štelcl: Institute of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic; Department of Biology, Faculty of Education, Masaryk University, Poříčí 7, 603 00 Brno, Czech Republic, e-mail: stelcl@sci.muni.cz

1. ÚVOD

Studie je věnována charakteristice druhotných produktů spalování uhlí v tepelné elektrárně v Oslavanech, která zde na místní haldě po dobu osmdesáti let deponovala odpady související s její činností. V současnosti tento materiál zpracovává společnost Prefa s.r.o. v rozsáhlém spektru stavebních prefabrikátů.

Oslavanská tepelná elektrárna vznikla v letech 1911–1913 jako reakce na nedostačnou výrobní kapacitu elektrárny zásobující elektrickou energií Brno a potřebu dlouhodoběji zajistit pro město její hospodárnější a ekonomicky výhodnější zdroj. Vlastní provoz byl zahájen 1. dubna 1913, s rostoucími požadavky na dodávku elektrické energie byly postupem času přistavovány další části. Z důvodu postupného útlumu těžby uhlí v rozsahu celého rosicko-oslavanského revíru a následného ukončení jeho dodávek byla elektrárna 30. května 1993 uzavřena (Kyselák 2001). Za dobu provozu elektrárny vyrostla v jejím sousedství asi 50 metrů vysoká halda, na níž byly dlouhodobě ukládány strusky a popílky vznikající spalováním místního, nepříliš kvalitního uhlí. Právě popílky jsou v literatuře běžně uváděny jako jedna z významných ekologických zátěží, koncentrující některé environmentálně významné radionuklidy nebo těžké kovy. Z tohoto důvodu je v práci věnována hlavní pozornost především tomuto typu druhotně vznikajících produktů.

Podle FEČKA *et al.* (2003) představuje popílek nejčastěji železoalumosilikátový prášek složený z mimořádně jemných částic o velikosti v rozsahu od 0,1–1000 μm . Jejich podíl, velikost a specifické mineralogické, chemické a fyzikální vlastnosti se v případech jednotlivých druhů popílků mohou navzájem značně lišit, a to zejména v závislosti na kvalitě spalovaných surovin a formě jejich spalování. Obecně platí, že čím jemněji mletý je vstupní produkt, tím jemnější bude i jeho nespalitelná část (KOLÁŘ 1969). Morfologicky jsou popílky nehomogenní. Skládají se z částic nespáleného uhlí (nedopalu) a vlastních popílkových částic (vitricko-alumosilikátové a oxidické sloučeniny). Tvar popílkových zrn ovlivňuje macerálové složení uhlí. V granulacích a výtavných kotlích vznikají vzhledem k vyšší teplotě spalování částice spíše zaoblené a sférické, zatímco popílky z fluidních kotlů jsou bližší původnímu tvaru zrn ještě před zahájením vlastního spalování (FEČKO *et al.*, 2003). Přítomnost a obsah minerálních fází v popílků závisí podle FEČKA *et al.* (2003) jak na množství a charakteru minerálů obsažených ve spalovaném uhlí, tak i na stupni jejich přeměny. V černém uhlí je krystalická fáze zastoupena přibližně deseti procenty, u popílků z výtavných ohnišť je obvykle přítomna v množství nižším než 15 %. Z chemického hlediska jsou v popílcích nejčastěji zastoupeny oxidy křemíku a hliníku, menší podíl tvoří oxidy železa, vápníku a hořčíku, jen relativně malou část reprezentují také alkálie a sírany. Popílky pocházející z klasického roštového spalování se vyznačují vyšším podílem oxidů hliníku, titanu a železa (HELA *et al.*, 2013). VÁVRA (1998) popisuje v popílcích vysoký obsah amorfního podílu a vysokoteplotních krystalických fází. Fluidní popílky jsou specifické vyšší koncentrací vápníku, přidávaného ve formě vápence do spalovacího procesu za účelem odsíření. Vyšší obsah siranů je charakteristický pro popílky vznikající spalováním hnědého uhlí.

Podle dosavadních environmentálních studií (např. FEČKO *et al.*, 2003) může být popílek v řadě případů nositelem nejrůznějších druhů polutantů, jako jsou četné toxické látky, těžké kovy a některé druhy radionuklidů představující nezanedbatelné zdroje radioaktivního záření. Tyto prvky, z nichž k nejčastějším patří arsen, beryllium, olovo, rtuť, kadmium, uran a thorium, se mohou při deponování popílků dostávat do okolí vlastních úložišť a kontaminovat zde půdy, povrchové vodní zdroje i ovzduší. V České republice, jejíž energetická politika je z více jak 50 % založena na technologii spalování uhlí, se mimo strusky a škváry ročně vyprodukuje přes 10 milionů tun elektrárenského popílku.

2. MATERIÁL A METODIKA

Na lokalitě bylo z různých míst haldy odebráno 10 vzorků, každý o hmotnosti 500 g. Takto získaný materiál byl následně analyzován s využitím zrnitostní analýzy, laboratorní gamaspektrometrie, rentgenové difrakční analýzy, rentgenové fluorescenční spektrální analýzy, elektronové mikroskopie a energiově disperzní analýzy.

2.1 ZRNITOSTNÍ ANALÝZA

Z každého vzorku byla po jeho vysušení odvážena jednotná hmotnost 200 g. Poté byly vzorky ručně síťovány pomocí sady sít s normalizovanou velikostí oka v rozpětí od 2 mm do 0,063 mm. Obdržené frakce byly zváženy s přesností na desetinu gramu, pro potřeby klasifikačního zařazení byly výsledné podíly z důvodu ztrát při síťování normalizovány na 100 %.

2.2 RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA

Vzorky byly před analýzou podrceny v isopropylalkoholu prostřednictvím laboratorního mlýnku McCrone Micronising Mill, zároveň k nim byl přidán standard v podobě 20 % hmot. podílu fluoritu – CaF_2 . Vlastní difrakční analýza byla provedena D. Všianským v laboratořích CEITEC Core Facility na difraktometru Rigaku Smartlab s Cu-anodou $\lambda\text{K}\alpha = 0,15418 \text{ nm}$ a 1-D pozičně citlivým detektorem při konvenční Bragg-Brentano para-

fokusační $\Theta - \Theta$ reflexní geometrii. Úhlová oblast $5 - 80^\circ 2\Theta$, krok - $0,02^\circ 2\Theta$, čas na krok - 0,6 s. Výsledná data byla zpracována pomocí programu High Score 3 plus. Kvantitativní fázová analýza byla provedena dle databáze ICSD 2012.

2.3 LABORATORNÍ GAMASPEKTROMETRIE

Obsah přirozených radionuklidů (K, U, Th) ve studovaném materiálu byl stanoven na Přírodovědecké fakultě UP v Olomouci na laboratorním gamaspektrometru DG - 1000 LAB se scintilačním NaI(Tl) detektorem o objemu $0,35 \text{ dm}^3$. Měření každého vzorku, vloženého do plastové nádoby o objemu 250 cm^3 , probíhalo po ustavení radioaktivní rovnováhy vždy po dobu 1800 s. Uvedeným postupem byly přímo zjišťovány obsahy draslíku (na základě koncentrace ^{40}K), zatímco množství uranu a thoria bylo ověřováno nepřímou prostřednictvím přeměnových produktů ^{214}Bi a ^{208}Tl (obsahy uranu a thoria jsou proto v následujícím textu uváděny jako eU a eTh). Obdržená data byla vyhodnocena programem LAB Center na výše uvedeném pracovišti. Ke komplexnímu zhodnocení radioaktivity odebraných vzorků, na níž se přirozené radioizotopy uplatňují různou měrou a v rozdílných poměrech, posloužil navíc přepočítaný naměřených koncentrací jednotlivých radioizotopů na hmotnostní aktivitu (a_m) ekvivalentního množství ^{226}Ra získanou z výsledků gamaspektrometrických měření na základě vztahu: $a_m = 12,35\text{U} + (1,43 \times 4,06\text{Th}) + (0,077 \times 313\text{K})$, do něhož byly obsahy draslíku dosazovány v %, obsahy uranu a thoria v ppm (BERETKA a MATTHEW 1985).

2.4 RENTGENOVÁ FLUORESCENCE

Rentgenfluorescenční analýza byla provedena v laboratoři Ústavu geologických věd Přírodovědecké fakulty MU (analyzovala E. Grešlová). Po vysušení vzorků byl každý rozdělen síťováním na 4 zrnitostní frakce. Tímto postupem byl vytvořen soubor obsahující celkem 40 vzorků. Analyzovaný materiál byl umístěn do plastového kalíšku s průhledným dnem a měřen rentgenovým spektrometrem Innov-X Systems, Inc. Delta v módu GEO-CHEM VANAD po dobu 280 s za užitého napětí 210 kV a 1–40 kV. Jako budící zdroj byla použita miniaturní rentgenka s Rh anodou.

2.5 ENERGIIVĚ DISPERZNÍ ANALÝZA A ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Energiivě disperzní analýza (EDX) byla využita k ověření kvantitativního chemického složení studovaných vzorků. K jejímu provedení posloužily tři leštěné tablety zhotovené ze směsi pískové, prachové a jílové frakce zalité v epoxidu. Vlastní analýza byla uskutečněna na elektronovém skenovacím mikroskopu JEOL JSM-6490LV vybaveném EDX mikroanalýzátorem (Oxford Instruments) v Laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy Ústavu geologických věd PřF MU Brno. Doba načítání vlastního spektra činila 75 sekund při použitím urychlovacím napětí 15 kV. Na témže zařízení se na 7 zvolených vzorcích, zrnitostně reprezentovaných směsí prachové a jílové frakce, uskutečnilo rovněž studium morfologie částic. Před zahájením analýzy byly všechny vzorky vakuově pokoveny uhlíkem a následně byl zobrazen a snímkován jejich povrch v režimu sekundárních elektronů.

3. VÝSLEDKY A DISKUSE

3.1 ZRNITOSTNÍ SLOŽENÍ

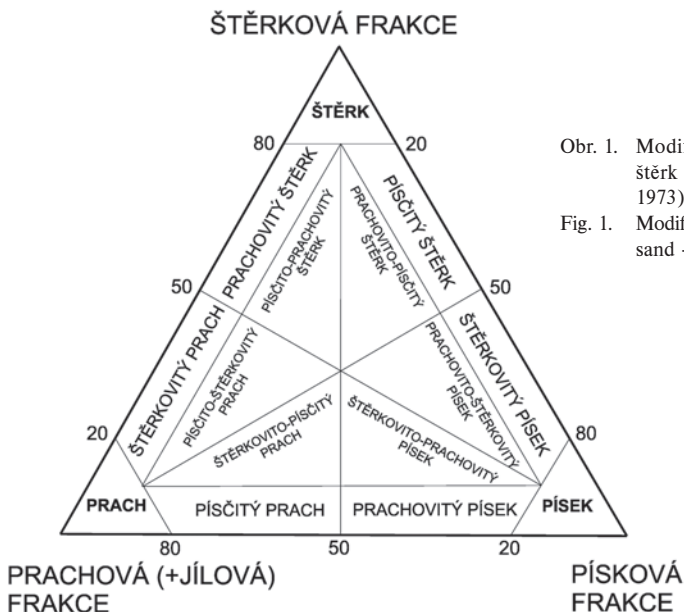
Z granulometrického hlediska (tab. 1) tvoří zkoumaný materiál tři velikostně odlišné frakce. Podíl převažující štěrkové (psefitické) frakce, zastoupené obvykle velkými spečenými či ostrohrannými úlomkovitými částicemi, reprezentuje u většiny studovaných vzorků množství od 44 do 68 % (průměrné zastoupení 55 %). Druhou kvantitativně nejfrekventovanější zrnitostní složku představuje písková frakce, zastoupená v analyzovaných vzorcích v intervalu 23–53 %. Jen v minimálním množství (1–9 %) je naopak přítomna směs prachu

a jilu. Vzhledem k tomu, že materiál deponovaný na haldě vykazuje některé znaky typické pro klastické sedimenty, byly výsledky granulometrických analýz vyneseny do modifikovaného klasifikačního diagramu štěrk - písek - prach + jíl (KONTA 1973, obr. 1). Ve smyslu této klasifikace lze osm z deseti hodnocených vzorků označit jako písčité štěrky, ve zbývajících dvou případech pak jako štěrkovitý písek (obr. 2). Překvapivě vysoký podíl hrubozrnné frakce (> 2 mm) může být ovlivněn významným obsahem nedopalu v deponovaném materiálu nebo může souviset s aglomerací popílkových částic do relativně větších agregátů, a to buď při procesech samotného vysokoteplotního spalování, nebo za přispění druhotně vznikajících produktů.

Tabulka 1. Zrnitostní složení studovaného materiálu.

Table 1. Grain composition of studied material.

číslo vzorku	štěrková frakce [%]	písková frakce [%]	prachová + jílová frakce [%]	suma [%]
1	56,4	37,4	6,2	100
2	68,3	22,5	9,2	100
3	45,7	46,8	7,5	100
4	55,0	38,4	6,6	100
5	50,7	44,5	4,8	100
6	66,0	29,6	4,4	100
7	43,6	53,0	3,4	100
8	63,5	35,4	1,1	100
9	51,0	42,5	6,5	100
10	50,4	44,5	5,1	100

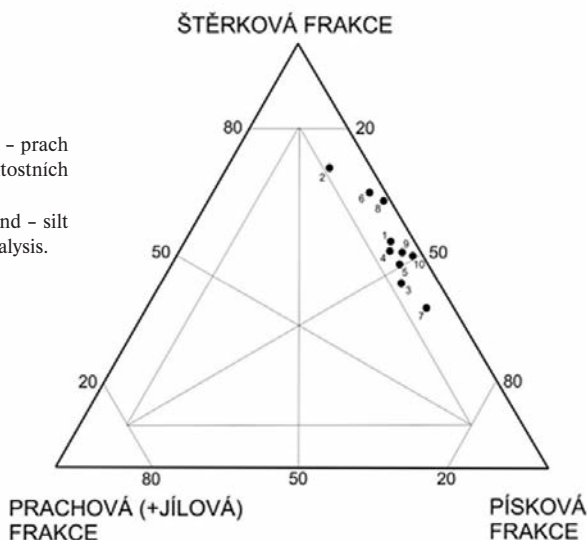


Obr. 1. Modifikovaný klasifikační diagram: štěrk - písek - prach + jíl (KONTA 1973).

Fig. 1. Modified classification diagram: gravel - sand - silt + clay (KONTA 1973).

Obr. 2. Klasifikační diagram: štěrk - písek - prach + jíl s vyznačenými výsledky zrnitostních analýz.

Fig. 2. Classification diagram: gravel - sand - silt + clay with results of grain size analysis.



3.2 FÁZOVÉ SLOŽENÍ STUDOVANÉHO MATERIÁLU

Minerální složení zrnitostní frakce < 0,063 mm tří náhodně vybraných vzorků (1, 3, 7) bylo identifikováno prostřednictvím rentgenové difrakce. Ve všech z nich byly prokázány rozdílné obsahy křemene, cristobalitu, mullitu, hematitu, magnetitu, sekundárně vzniklého sádrovce a anhydritu (tab. 2), u vzorku 7 byla navíc potvrzena přítomnost illitu související s jeho možným znečištěním. Z významného podílu amorfní fáze, reprezentujícího vždy více jak 80 hmot. % analyzovaného materiálu, lze předpokládat vysokoteplotní spalování primárního produktu (FEČKO *et al.*, 2003).

Tabulka 2. Fázové složení studovaných vzorků popílku (hmot. %).

Table 2. Phase composition of studied ash samples (in wt. %; vz. č. = sample number...).

vz. č.	křemen	cristobalit	mullit	hematit	magnetit	sádrovec	anhydrit	illit	amorf.fáze
1	3,6	0,2	5,8	0,6	0,3	2,3	0,4	–	87,4
3	5,4	0,1	8,1	0,8	0,3	1,8	0,3	–	84,0
7	3,8	0,2	4,6	0,6	0,1	0,3	0,4	1,0	89,6

3.3 PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA

Laboratorně stanovené obsahy přirozených radionuklidů (K, eU, eTh) ve studovaném materiálu jsou sumarizovány v tabulce 3. V rámci získaných výsledků je pro všechny vzorky signifikantní vyšší zastoupení eTh, jehož obsah se pohybuje v úzkém intervalu od 19,5 do 22,1 ppm (průměrná hodnota 20,5 ppm). Úzký rozptyl vykazují ve sledovaném souboru rovněž obsahy eU (13,9–15,7 ppm; průměrná hodnota 14,8 ppm) i K (2,8–3,2 %; průměrná hodnota 3,1 %). Vypočtená hmotnostní aktivita spadá do intervalu 366–391 Bq.kg⁻¹, s průměrnou hodnotou 375 Bq.kg⁻¹.

Analogické údaje poskytl srovnání naměřených dat s výsledky laboratorního měření radioaktivity popílkového materiálu deponovaného v bývalém úložišti Brno-Hády (viz např. DOLEŽELOVÁ 2013), jehož primárně spalované suroviny pocházejí rovněž z oblasti rosicko-oslavanského revíru. Zaznamenané dílčí rozdíly mohou souviset s částečně odlišným zrnitostním složením studovaných vzorků. I přes tuto skutečnost však lze ve vztahu k horninovému prostředí považovat obsahy přirozených radioaktivních prvků, zejména eU a eTh, v posuzovaném odpadním materiálu za výrazně „nadklarkové“. Vypočtená průměrná hmotnostní aktivita 375 Bq.kg^{-1} převyšuje maximální stanovený limit 300 Bq.kg^{-1} legislativně uváděný vyhláškou SÚJB pro stavební materiál vyráběný ze škváry, popílků a strusek a určený pro stavby s obytnými a pobytovými místnostmi (SÚJB 2005).

Tabulka 3. Laboratorně stanovené koncentrace K, eU a eTh a vypočtená hmotnostní aktivita v popílcích a struskách deponovaných na haldě bývalé elektrárny v Oslavanech (σ = průměrná odchylka).

Table 3. Laboratory-measured concentrations of K, eU, eTh and the calculated mass activity in ashes and slags deposited on the heap of former power station in Oslavany (σ = average deviation).

vzorek číslo	K [hmot. %]	σ K [hmot. %]	eU [ppm]	σ eU [ppm]	eTh [ppm]	σ eTh [ppm]	a_m [Bq.kg^{-1}]
1	2,9	0,1	14,7	0,3	19,8	0,8	366
2	3,0	0,1	14,0	0,3	22,1	0,7	374
3	2,8	0,1	14,6	0,3	20,7	0,7	368
4	3,2	0,1	15,1	0,3	20,1	0,8	380
5	3,1	0,1	15,5	0,3	19,5	0,8	379
6	3,1	0,1	15,7	0,3	21,0	0,8	391
7	3,1	0,1	14,3	0,3	20,7	0,8	372
8	3,1	0,1	14,1	0,3	20,2	0,8	366
9	3,1	0,1	15,6	0,3	19,6	0,8	381
10	3,2	0,1	13,9	0,3	20,8	0,7	370

3.4 CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Výsledky provedených EDX analýz (tab. 4) prokázaly u všech tří zkoumaných vzorků (viz kapitola Materiál a metodika) jejich standardní hlinito-křemičitý charakter. K dominantním prvkům patří zejména křemík (prům. 40 hmot. % SiO_2), hliník (prům. 18 hmot. % Al_2O_3) a vápník (prům. 10 hmot. % CaO), které jsou navíc doprovázeny alkalickými kovy (prům. 2 hmot. % Na_2O a 3 hmot. % K_2O). Zajímavé jsou relativně vysoké obsahy FeO , jehož průměrné zastoupení odpovídá hodnotě 10,2 hmot. %. Obdobné koncentrace železa zmiňují v popílkovém materiálu např. KUMAR *et al.* (2016) a LI *et al.* (2009). Vyšší přítomnost železa, síry i vápníku v analyzovaných vzorcích může být interpretována výskytem syngenetické i epigenetické sulfidické a karbonátové mineralizace reprezentované v uhelných sedimentech rosicko-oslavanského souvrství zejména pyritem a kalcitem. BOUŠKA *et al.* (2000) uvádějí pyrit jako hojnou mikroskopickou součást zdejšího uhlí, v němž impregnuje fosilizované zbytky rostlin, a považují jej za hlavní příčinu relativně vysokých obsahů síry. BURKART (1953) předpokládá v uhelné hmotě rovněž výskyt mikroskopicky přítomného markazitu.

Tabulka 4. Kvantitativní chemické složení (hmot. %) směsi pískové, prachové a jílové frakce z haldy v Oslavanech (data uvedená v tabulce představují průměrné hodnoty vypočtené vždy z pěti provedených EDX analýz).

Table 4. Chemical composition (wt. %) of the mixture of sand, silt and clay fraction from heap in Oslavany (numbers represents average values calculated from five EDX measurements).

vz. č.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	suma
2	1,8	2,1	19,4	52,6	0,1	5,5	3,2	8,6	0,7	0,1	6,1	100
6	2,4	6,5	18,0	43,4	0,0	0,2	2,3	13,1	0,4	0,0	13,7	100
9	1,2	3,7	17,4	40,0	0,7	8,1	2,5	8,8	0,5	0,3	16,9	100

3.5 PŘÍTOMNOST POTENCIÁLNĚ RIZIKOVÝCH PRVKŮ VE STUDOVANÉM POPÍLKU

Obsahy stopových prvků ve studovaných vzorcích popílku jsou sumarizovány v tab. 5. Zvláštní pozornost byla v tomto směru věnována především polutantům, majícím tendenci pronikat do bezprostředního i vzdáleného okolí haldy a ovlivňovat negativně životní prostředí.

Tyto komponenty, z nichž k nejvýznamnějším patří především arsen, olovo, kadmium a rtuť, se ve studovaném materiálu vyskytují ve většině vzorků v relativně malém množství, a to zpravidla pod úrovní jejich standardně uváděných průměrných obsahů v kontinentální kůře (viz např. HOLLAND a TUREKIAN 2014) nebo limitních hodnot platných pro přítomnost rizikových prvků v půdách (MŽP 1993, 2016), popř. pod detekčním limitem použitého přístroje. Výjimku tvoří z tohoto hlediska pouze arsen, jehož obsahy se v jednotlivých vzorcích pohybují v intervalu 11–129 ppm (průměrná hodnota 44 ppm) a olovo, které je zastoupeno od analyticky neidentifikovatelného množství do 60 ppm. Zatímco průměrné množství 18 ppm olova v hodnoceném materiálu odpovídá prakticky jeho zastoupení v kontinentální kůře (11 ppm), zaznamenaný obsah arsenu od 11 do 129 ppm (průměr 40 ppm) průměrné hodnoty (2,5 ppm) několiknásobně převyšuje. Námí prokázané koncentrace obou prvků na druhé straně zdaleka nedosahují hodnot, které zmiňuje v popelu uhlí např. KREJCI-GRAF (1972), kde maximální obsahy olova činí více jak 1000 ppm, v případě arsenu až 8000 ppm. Výrazné obohacení uhelného popela jmenovanými polutanty spojuje tento autor s procesy sekundárního obohacování. YUDOVICH a KETRIS (2004) uvádějí průměrné množství As v bituminózních typech uhlí a v lignitu hodnotami 9,0±0,8 a 7,4±1,4 ppm. Za zvýšené považují již obsahy 50±5 a 49±8 ppm a popisují je jako typické pro uhelné pánve na území České republiky. Za hlavní nositele As pokládají zejména pyrit s možnou příměsí arzenopyritu. Právě přítomností sulfidického arzenopyritového zrudnění může být podle ŠAFÁŘOVÉ a ŘEHOŘE (2006) interpretována relativně vysoká přítomnost As v uhelných sedimentech severočeské hnědouhelné pánve. Syngenetická i epigenetická pyritová mineralizace byla mimo jiné popsána i v uhelných slojích bývalého rosicko-oslavanského revíru, jejichž surovina byla dlouhodobě spalována samotnou elektrárnou v Oslavanech (BOUŠKA *et al.* 2000). Přítomnost arsenu v množství kolem 320 ppm popisují v derivátech vzniklých při spalování uhlí při teplotách kolem 525 °C např. PANDEY *et al.* (2011). Srovnatelné zvýšené obsahy As (<5–392 ppm) společně s vyšším zastoupením Pb (108–7460 ppm) a Cd (6–380 ppm) ve 13 odlišných typech popílků popsali v poslední době např. SAQUIB a BÄCKSTRÖM (2016).

Zvýšené koncentrace ostatních minoritních prvků potvrdily provedené analýzy u titanu a vanadu, rubidia a stroncia. Obsahy stopových prvků vykazují celkově stoupající trend ve směru od hrubších k jemnějším zrnitostním frakcím.

Výsledky provedeného výzkumu prokázaly na jedné straně přítomnost některých potenciálně nebezpečných prvků, tyto se však ve studovaném materiálu vyskytují v koncentracích, které nelze z environmentálního hlediska považovat za rizikové.

Tabulka 5. Obsahy stopových prvků (ppm) zjištěné v odlišných zrnitostních frakcích studovaného materiálu (LOD = detekční limit).

Table 5. Contents of trace elements (ppm) detected in different grain size fractions of the studied material (vz. č. = sample number ..., Š = gravel; P = sand; P + J = silt + clay; LOD = limit of detection).

Č. vz.	Ti	V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Zr	Mo	Cd	Hg	Pb
1 Š	4088,5	352,4	110,4	62,4	58,1	39,9	22,5	226,6	162,0	107,9	8,4	<LOD	<LOD	6,0
1 P	3391,2	273,4	80,7	111,0	79,2	52,7	44,4	208,7	155,9	94,9	10,3	<LOD	<LOD	14,9
1 P+J	3553,9	277,4	61,2	116,2	88,9	80,8	61,9	203,4	160,6	95,2	13,0	<LOD	<LOD	25,3
2 Š	3978,0	312,2	91,0	67,9	52,3	54,9	28,5	234,0	191,6	121,5	12,1	<LOD	<LOD	<LOD
2 P	3499,2	244,3	116,9	85,6	74,0	51,2	37,5	210,6	170,0	99,7	12,1	<LOD	<LOD	16,3
2 P+J	3773,7	262,5	68,1	119,0	102,0	88,5	60,7	209,6	173,7	94,2	16,8	17,4	<LOD	28,6
3 Š	3760,1	349,8	101,0	91,2	58,2	44,3	33,2	222,7	181,6	110,7	10,2	<LOD	<LOD	6,6
3 P	3689,0	300,9	82,6	84,2	74,6	54,8	38,0	214,7	153,8	103,3	9,2	<LOD	<LOD	13,1
3 P+J	3582,3	295,7	67,9	110,8	89,6	79,6	57,0	211,9	157,0	100,1	11,5	<LOD	<LOD	26,2
4 Š	3559,0	352,1	82,2	183,7	73,2	48,1	40,0	192,9	173,7	98,9	8,7	<LOD	<LOD	9,9
4 P	3500,3	301,3	65,2	94,4	74,0	55,8	39,3	214,0	161,6	106,1	11,7	<LOD	<LOD	16,5
4 P+J	3667,6	283,5	83,6	129,3	99,7	90,4	69,8	205,6	157,7	100,4	13,0	<LOD	<LOD	30,2
5 Š	4022,6	330,4	102,7	95,0	54,3	42,5	15,2	234,7	181,1	113,2	8,4	<LOD	<LOD	2,9
5 P	3740,3	256,2	78,9	101,0	74,6	52,6	39,9	222,3	159,9	100,7	11,9	<LOD	<LOD	13,1
5 P+J	3706,3	258,4	70,2	135,4	105,1	92,9	68,5	209,0	167,7	100,1	15,5	10,2	<LOD	29,1
6 Š	4038,5	373,3	103,1	97,2	55,8	39,1	14,1	230,2	178,2	118,3	8,9	<LOD	<LOD	6,5
6 P	3465,4	270,8	70,4	91,4	73,2	52,2	39,1	212,2	157,4	98,3	10,2	<LOD	<LOD	15,2
6 P+J	3617,6	330,0	64,6	143,3	109,4	101,1	74,1	200,6	168,3	95,3	15,1	<LOD	<LOD	33,9
7 Š	3929,4	334,6	129,1	95,4	59,3	40,3	20,1	232,9	195,8	114,3	9,0	<LOD	<LOD	5,7
7 P	3660,1	295,9	79,8	115,4	84,6	55,5	36,1	219,3	182,6	108,0	10,9	<LOD	<LOD	12,5
7 P+J	3928,8	288,9	79,8	142,7	122,4	99,0	65,1	219,2	182,4	101,2	16,0	<LOD	<LOD	31,8
8 Š	4234,6	327,1	102,0	103,0	60,0	42,7	16,1	231,5	221,1	119,1	10,1	<LOD	<LOD	6,0
8 P	4088,5	295,5	100,5	110,7	74,9	40,6	22,2	218,0	235,6	114,4	11,9	<LOD	<LOD	6,3
8 P+J	4100,6	283,8	78,5	138,1	120,8	100,2	57,6	228,0	199,6	107,1	15,7	<LOD	<LOD	36,6
9 Š	4114,4	316,9	118,3	85,6	54,8	42,5	15,1	231,2	207,2	117,4	9,2	<LOD	<LOD	6,4
9 P	3623,1	301,8	71,1	85,6	76,6	52,7	41,5	217,3	162,3	99,4	11,3	<LOD	<LOD	13,1
9 P+J	4312,0	347,9	77,4	209,6	167,5	168,9	128,9	186,8	182,5	106,3	24,2	12,1	<LOD	45,4
10 Š	4221,3	336,0	108,2	80,8	65,6	30,8	11,1	226,1	219,4	126,7	9,8	<LOD	<LOD	3,2
10 P	4227,6	271,7	100,0	104,1	90,3	41,7	24,9	221,4	207,8	114,9	11,3	<LOD	<LOD	11,6
10 P+J	4323,1	312,1	99,4	217,1	250,9	151,9	81,2	194,5	205,3	120,5	26,2	<LOD	6,1	59,9

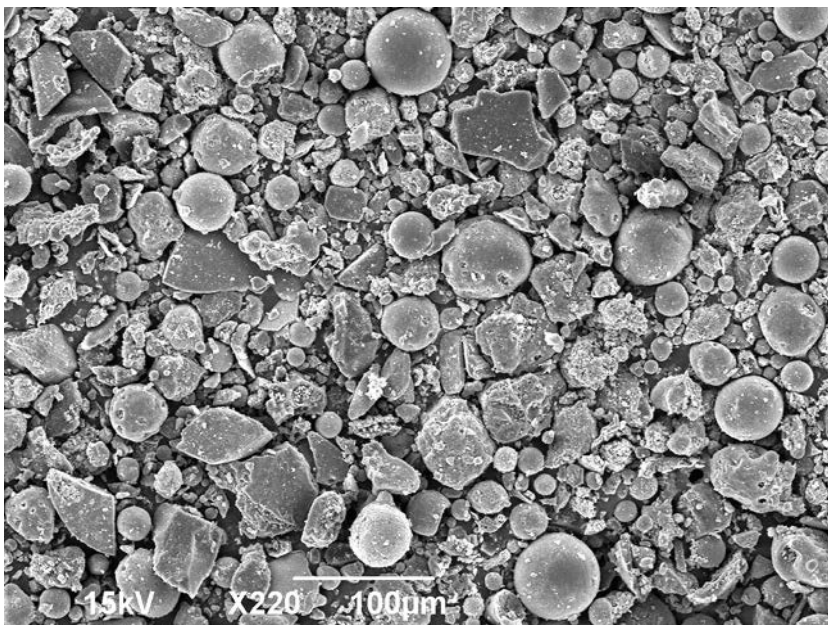
3.6 MORFOLOGICKÉ ZHODNOCENÍ ČÁSTIC

Všechny studované vzorky jsou tvořeny nepravidelně omezenými, mnohdy ostrohrannými struskovitými úlomky převážně s nerovným povrchem nebo jejich agregáty o rozměrech v desítkách až jednotkách μm (obr. 3). Pro většinu materiálu je charakteristická přítomnost tzv. mikrosfér (obr. 4), vznikajících jako produkt vysokoteplotního spalování uhlí v intervalu od 1200 do 1500 °C (Fečko *et al.*, 2003). Jejich průměrná velikost se pohybuje od 50 do 70 μm . V některých vzorcích byla uvnitř mikrosfér nalezena jak výše popisovaná zrna, tak i automorfne omezené mikrokrystaly některých minerálních fází (sádrovec/anhydrit).

4. ZÁVĚR

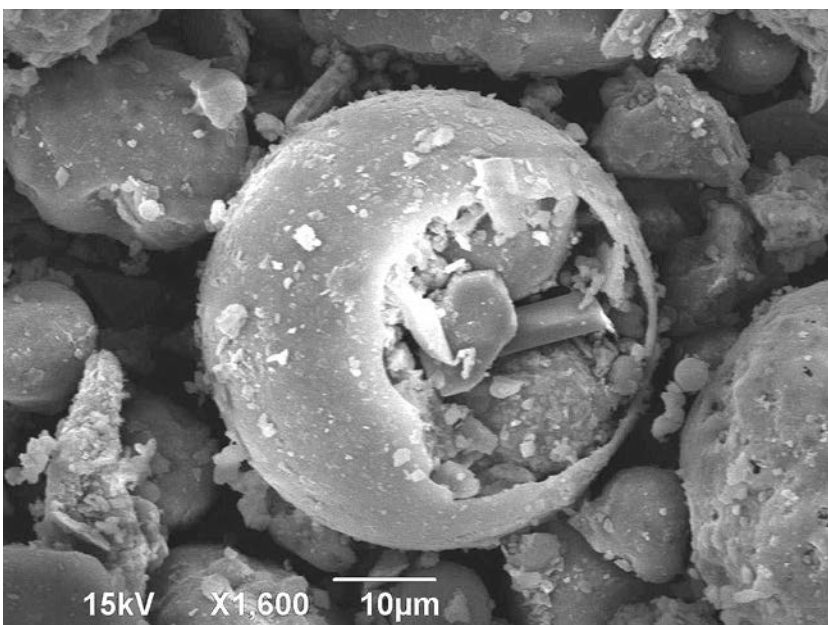
Hlavním cílem provedené studie bylo ověření potenciální rizikovosti materiálu depovaného na haldovém úložišti bývalé tepelné elektrárny v Oslavanech.

Uložený materiál, odpovídající zrnitostně písčitému šterku až šterkovitému písku, je tvořen variabilním podílem křemene, cristobalitu, mullitu, hematitu, magnetitu, sádrovce a anhydritu.



Obr. 3. Ostrohranná zrna, struskovité agregáty a mikrosféry tvořící jemnozrnnou frakci studovaných vzorků.

Fig. 3. Sharp-edged grains with slag shaped aggregates and microspheres forming fine-grained fraction of studied material.



Obr. 4. Narušený plášť mikrosféry s mikrokrystaly sádrovce/anhydritu.

Fig. 4. Eroded surface with microcrystals of gypsum/anhydrite.

Výsledky gamaspektrometrického stanovení K, eU a eTh, společně s vypočtenou hmotnostní aktivitou ekvivalentu ^{226}Ra , naznačují v případě popílků překročení stávajících, legislativně platných limitů $300 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (SÚJB 2005) platných pro výrobu stavebních materiálů a jejich využití pro stavby s obytnými nebo pobytovými místnostmi.

Výsledky studia chemického složení prokázaly v případě všech analyzovaných vzorků popílků jejich standardní hlinito-křemičitý charakter s dominantním zastoupením křemíku, hliníku a vápníku, doprovázený zejména alkalickými kovy a zvýšeným podílem železa.

Výsledky výzkumu potvrdily přítomnost některých potenciálně nebezpečných prvků (As, Pb, Cd, Hg), které se však ve studovaném popílků vyskytují v koncentracích, které s výjimkou As nelze z hlediska aktuálně platných limitů stanovených např. Ministerstvem životního prostředí (MŽP 2016) jednoznačně považovat za rizikové.

Všechny studované vzorky jsou tvořeny nepravidelně omezenými, ostrohrannými struskovitými úlomky s nerovným povrchem nebo jejich agregáty a jsou charakteristické přítomností tzv. mikrosfér, vznikajících při využití technologie vysokoteplotního spalování uhlí.

Dosavadní dílčí výsledky provedeného studia naznačují, že materiál deponovaný na haldě bývalé elektrárny v Oslavanech představuje v současné podobě pouze jistý druh ekologické zátěže a není třeba jej posuzovat z environmentálního hlediska jako bezprostředně rizikový.

LITERATURA

- BERETKA, J., MATTHEW, P. J., 1985: Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. – *Health Phys.* 48, 87–95.
- BOUŠKA, V., PEŠEK, J., SÝKOROVÁ, I., 2000: Probable modes of occurrence of chemical elements in coal. – *Acta Montana*, B 117, 10, 53–90.
- BURKART, E., 1953: Moravské nerosty a jejich literatura. *Mährens Minerale und ihre Literatur*. – Nakl. ČSAV. Praha, 1008 p.
- DOLEŽELOVÁ, S., 2013: Odkaliště sypkých průmyslových odpadů jako specifický druh ekologických zátěží. – MS, bakalářská práce. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity. Brno. 50 p.
- FEČKO, P., KUŠNĚROVÁ, M., LYČKOVÁ, B., ČÁBLÍK, V., FARKAŠOVÁ, A., 2003: Popílků. – VŠB – Technická univerzita Ostrava. Ostrava. 187 p.
- HELA, R., SOKOL, P., DONÁT, P., KOŠAROVÁ, G., ORSÁKOVÁ, D., 2013: Popílek v betonu. – ČEZ Energetické produkty s.r.o. Brno. 167 p.
- HOLLAND, H. D., TUREKIAN, K. K., 2014: *Treatise on Geochemistry*. – Second Edition, vol. 4: The Crust. Elsevier Science. 805 p.
- KOLÁŘ, L., 1969: Popílků a možnost jejich využití. – *Práce*. Praha. 92 p.
- KONTA, J., 1973: Kvantitativní systém reziduálních hornin, sedimentů a vulkanoklastických usazenin. – *Universita Karlova*. Praha. 375 p.
- KREJCI-GRAF, K., 1972: Trace metals in sediments, oils, and allied substances. – In: *Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Sciences*, Fairbridge R. W. ed. – Van Nostrand R. Co., New York, 1201–1209.
- MŽP, 1993: Rizikové prvky v půdách náležejících do zemědělského půdního fondu. – Příloha k vyhlášce č. 13/1994 Sb., Praha.
- MŽP, 2016: Indikační hodnoty rizikových prvků. – ATLAS Consulting, spol. s r.o.
- PANDEY, V. CH., SINGH, J. S., SINGH, R. P., SINGH, N., YUNUS, M., 2011: Arsenic hazards in coal fly ash and its fate in Indian scenario. – *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 9–10, 819–835.
- SAQUIB, N., BÄCKSTRÖM, M., 2016: Chemical association and mobility of trace elements in 13 different fuel incineration fly ashes. – *Fuel*, 165, 1, 193–204.
- ŠAFÁROVÁ, M., ŘEHOŘ, M., 2006: Stopové prvky v uhelných a neuhelných sedimentech severočeské pánve a zemínách rekultivovaných lokalit. – *Chem. Listy* 100, 462–466.
- VÁVRA, V., 1998: Kvantitativní RTG fázová analýza popílků a popílkových kompozitů. – MS, disertační práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. Brno. 62 p.
- YUDOVICH, Ya. E., KETRIS, M. P., 2004: Arsenic in coal: a review. – *International Journal of Coal Geology*, 61, 3–4, 141–196.

INTERNETOVÉ ZDROJE

- KUMAR, S., YANKWA DJOBO, J. N., KUMAR, A., KUMAR, S., 2016: Geopolymerization behaviour of fine iron-rich fraction of brown fly ash. – *Journal of Building Engineering*, Volume 8, December 2016, Pages 172–178. – On line: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216301528>.
- KYSELÁK, J., 2001: Elektrárna Oslavany. – On line: <http://www.rosicko-oslavansko.cz/13-historie/32-elektrarna-oslavany>.
- LI, Y., ZHANG, F., XIU, F., 2009: Arsenic removal from aqueous system using adsorbent developed from a high iron-containing fly ash. – *Science of The Total Environment*, Volume 407, Issue 21, 15 October 2009, Pages 5780–5786. – On line: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709006743>.
- SÚJB, 2005: Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně. Přílohy ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. – On line: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/Vyhlaska_2002_307_ve_zneni_2005_499_prilohy.pdf.