

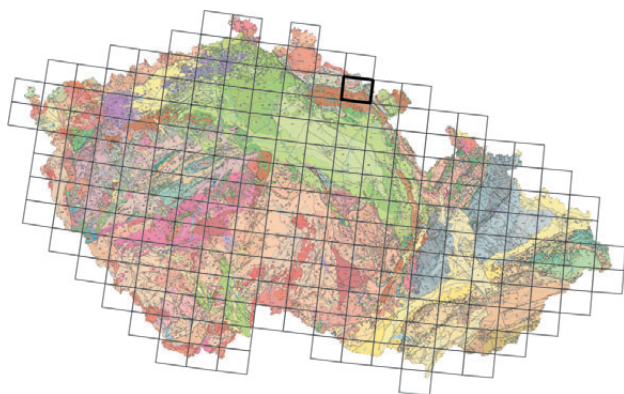
BIOGEOCHEMICKÁ AKUMULACE TĚŽKÝCH KOVŮ NA HALDĚ OPUŠTĚNÉHO UHELNÉHO A URANOVÉHO DOLU V BEČKOVĚ U ŽACLĚŘE

Biogeochemical accumulation of heavy metals at waste dump of former uranium and coal mine at Bečkov near Žacléř

BOHDAN KRÍBEK – JAN MALEC – IVAN BARNET – ILJA KNĚSL – PETR LUKEŠ

Česká geologická služba, Geologická 6, 152 00 Praha 6

(03-42 Trutnov)



Key words: coal waste dumps, selfignition, geochemistry, mineralogy, bioavailable metals, uranium

Abstract: The waste rock dumped at abandoned coal and uranium mine in Bečkov was found to contain enhanced contents of uranium and other elements. During spontaneous ignition of the dump some metals, particularly Cd, As, Pb, U, then Zn, Se, Ag, Sn and Sb were remobilized and accumulated in the summit part of the burnt dump. Many anthropogenic mineral phases were identified in the heavy fraction of dump material (density > 2,9): lead, tin, alloy of Pb and Sn, galenite, PbSn-oxide, two Pb-oxides, Sn-oxide, anglesite, metallic selenium, Pb-selenate or selenite, Fe-oxides ± Cu, Zn, As, unidentified mineral of Cu-As-O. Anglesite (incrustations and skeleton-like crystals) and Fe-oxides (magnetite, hematite) predominate. The metals are progressively extracted and absorbed by vegetation, mostly by birch and beech trees. Coefficients of biogeochemical enrichment of metals in leaves of trees increase in a sequence U→Pb→Cu→Mo→As→Cd→Zn. High contents of zinc and cadmium were also identified in humic layer that originates on the dumps. However, because of low age of the humic layer, the majority of other metals are still depleted in humus relative to dumped waste rock. The degree of depletion decreases as follows: U→(Mo, Cu, Ni)→Pb→As. As a consequence, the contents of arsenic and lead in humic layer are expected to grow faster in future than those of uranium and other elements.

Halda leží na jz. úpatí Vraních hor, asi 7 km jv. od Žacléře. Nachází se pod zpusťným areálem bývalých důlních budov jámy č. 3 dolu Novátor, asi 150 m szs. od Bečkova. Tato jáma byla hlavním těžním dílem na ložisku Rybníček, na němž bylo v letech 1954–1957 dobýváno uranové zrudnění, které provázelo tzv. rybníčkovskou sloj, nacházející se v bečkovských vrstvách chvalečského souvrství (autun). Sloj měla mocnost v průměru okolo 0,5 m a úklon cca 20°; uhlí nebylo příliš kvalitní, obsahovalo 2,8 % síry a příměs

jílových minerálů, kalcitu, sideritu, pyritu, chalkopyritu, pyrhotinu, sfaleritu, galenitu a radioaktivních minerálů (PEŠEK et al. 2001). Uranová mineralizace byla vázána převážně na fusinitizované typy uhlí s vysokým obsahem pyritu (ARAPOV et al. 1984). Dvě významnější rudní tělesa byla tvořena systémem drobných rudních čoček v uhelném proplástku o mocnosti pouhých 0,1 m; zrudnění se nacházelo také v uhelných vrstvičkách v pískovcích v nadloží sloje. Uranová mineralizace byla převážně jemně dispergovaná a představovaly ji hlavně tzv. uranové černě, vzácněji uranit. Kromě uranu obsahovaly uhelné sedimenty Pb, Zn, Cu, Mo, Cd, As, Hg a další kovy. Obsahy dosahovaly u Mo 0,6 %, u Pb 0,5 % (ČADKOVÁ in TÁSLER et al. 1979, PAULIŠ et al. 2007).



Obr. 1. Hořící halda v roce 1962, pohled od jihu. Foto J. Malec.

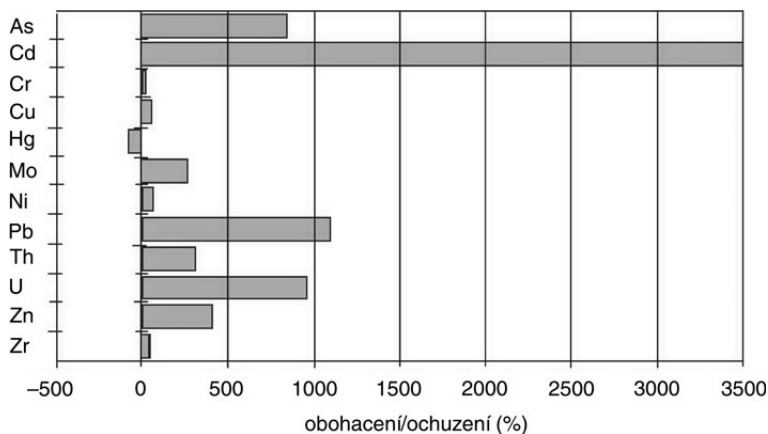


Obr. 2. Stav haldy v roce 2008, pohled z jižní strany. Foto J. Malec.

Tabulka 1. Průměrné obsahy C_{org} , C_{karb} , S_{tot} a vybraných prvků v substrátu a humusu nevyhořelých a vyhořelých hald ve srovnání s nekontaminovanou humusovou vrstvou a půdním substrátem ze stejné oblasti

	nevyhořelé haldy		vyhořelé haldy		srovnávací půda	
	substrát	humus	substrát	humus	substrát	humus
C_{org}	9,45	29,97	1,24	36,53	2,91	20,97
C_{karb}	0,39	0,12	0,48	0,32	0,01	20,97
S_{tot}	0,75	0,3	1,46	0,41	0,04	0,19
Cu	1475	217	2749	180	10	24
Zn	488	491	3078	1417	53	240
Mo	32	6,7	141,5	7,8	2,5	2,5
Cd	4,2	3,6	193,3	49,2	0,4	2
Pb	1 540	506	23 501	3026	43	79
Hg	1	0,23	0,16	0,33	0,11	0,22
As	69,8	19,8	831,6	103,3	15,6	12,3
Co	102	49	143	26	46	36
Ti	4 663	2 229	5 880	1 066	3 703	2 177
U	179	18,4	2 369	20	3	3
Th	32	33	166	21,5	19	16
Zr	190	112	381	76	384	249
Ni	48,3	17	89	6	15	12

obsahy C_{org} , C_{karb} a S_{tot} v procentech, obsahy dalších prvků v ppm, obsahy Cu, Zn, Mo, Cd, Pb, Hg, As, Co a Ni byly stanoveny metodami atomové absorpce (*aqua regia*), obsahy Th, U, Ti a Zr rentgen-fluorescenční analýzou, 5 vzorků z nevyhořelé haldy, 3 vzorky z vyhořelé haldy



Obr. 3. Obohacení/ochuzení vyhořelé haldoviny uvedenými prvky vzhledem k jejich obsahům v původní haldovině. Obsahy kovů v obou typech materiálu byly normalizovány obsahy titanu.

Hledání a těžba uhlí v okolí započaly již v 19. století. Ložisko uranu bylo zkoumáno od r. 1947, v letech 1953–1957 se těžilo a pak do r. 1959 dotěžovalo uhlí. Jáma měla hloubku 190 m, 10 pater a sloužila jako vtažná. Po skončení dobývání byla r. 1960 zasypána haldovinou a uzavřena betonovou deskou (SPUDIL et al. 1996, PAULIŠ et al. 2007). Celkem bylo z ložiska získáno 170,8 t U (KAFKA ed. 2003).

Po těžbě zůstalo v okolí Bečkova 13 starých hald, z toho 5 s radioaktivním materiálem. Halda jámy č. 3 je asi 25 m vysoký val, složený z několika dílčích hřbetů a kup, zaujímajících plochu cca 12 200 m². Její objem je přibližně 100 000 m³. Haldovinu tvoří šedé břidlice, pís-kovec, červeně vypálené břidlice a malé zbytky uhlí (MALEC 2001). Část haldy byla postižena kaustickými procesy (samovznícením). V 60. letech minulého století byla halda zcela holá (obr. 1) a z rozpáleného temene jejího j. hřbetu vystupovaly zřetelně patrné dýmy horkých par (MALEC 2001). Při ústí průduchů byla nalezena řada sublimovaných a novotvořených minerálů – síra, salmiak, galenit, anglesit, selen, keramo-halit, halotrichit aj. (PADĚRA 1964). Dnes je celá halda hustě zarostlá (obr. 2). Porost haldy tvoří hlavně břízy, v menší míře buky, vzácně smrky a pak traviny a různé rumištní byliny. Postupně dochází na haldě ke vzniku humusové vrstvy; její mocnost značně kolísá a pohybuje se od několika milimetrů do 3 cm.

Cílem provedených prací bylo objasnění vlivu kaustických procesů na geochemické a mineralogické složení haldových materiálů, posouzení vstupu uranu a dalších těžkých kovů z původní i teplotně alterované haldoviny do vegetace a posouzení trendů jejich akumulace v humusové vrstvě.

Použité metody

Po odstranění opadu byly na haldě odebírány vzorky humusu, po odstranění humusové vrstvy pak vzorky haldoviny z hloubky 2–20 cm. V obou těchto případech byly vzorky sítovány plastickým sítem 0,2 mm a podsítné frakce byly homogenizovány na analytickou jemnost. Radiometrická měření byla provedena na místech odběru vzorků. Na vyhořelých částech haldy byly vzorky odebírány v jejich apikální části, v blízkosti kouřových průduchů.

Stanovení stopových prvků v materiálu vyhořelých i nevyhořelých částí haldy a z humusu bylo provedeno metodami rentgen-fluorescenční analýzy (RFA, celkové množství kovů). Stejně vzorky byly analyzovány po výluhu směsí HCl a HNO₃ (*aqua regia*) s použitím metod atomové absorpce (AAS). Kovy byly ze substrátu extrahovány směsí HCl a HNO₃ (*aqua regia*), 0,01 M a 0,11 M roztokem CaCl₂

do roztoku komplexonu III (metoda podle Mehlicha), do roztoku EDTA a roztoku DTPA. Obsah kovů ve výlužích byl stanoven metodami atomové absorpce v laboratořích České geologické služby a v Ústavu meliorací a ochrany půdy na Zbraslavi. Kovy ve vegetaci byly stanoveny po jejich spálení a rozpuštění popela v HNO₃ metodou ICP-MS v laboratořích firmy Ecochem s. r. o.

Ve zprůměrovaném vzorku vyhořelé haldoviny bylo rýžováním a dělením v těžké kapalině (acetylentetrabromidu) zjištěno množství těžkých minerálů. V získaném koncentrátu byly hledány minerální fáze tvořené kovy, které se ve větších množstvích vyskytovaly v rudnině; jejich určování bylo prováděno v laboratořích České geologické služby zejména pomocí EDX-mikroanalyzátoru, připojeného k elektronovému rastrovacímu mikroskopu. Nejhojnější minerály olova byly určeny rentgenograficky.

Výsledky a diskuse

Radioaktivita haldových materiálů a obsahy radonu v haldách

Ve srovnání s referenčním měřením příkonu dávkového ekvivalentu mimo haldy (0,14–0,17 mSv/h) je příkon dávkového ekvivalentu na haldách značně vyšší a pohybuje se v rozmezí 0,29–1,18 μ Sv/h na původních a v rozmezí 0,49–0,76 μ Sv/h na vyhořelých částech haldy. Vliv kaustického přepracování na hodnoty radioaktivity je tedy malý; radiační riziko na haldách je nízké. Koncentrace radonu v haldovém materiálu odpovídala hodnotám 117,2–161,2 kBq/m³.

Stopové prvky v původní a vyhořelé haldovině

Obsahy stopových prvků v původních i vyhořelých haldových materiálech se značně liší (tab. 1).

Vyhořelý haldový materiál obsahuje ve srovnání s původní haldovinou vyšší obsahy prakticky všech analyzovaných prvků. Navíc byly ve vyhořelé haldovině detekovány vysoké obsahy selenu (do 126 ppm), stříbra (do 50 ppm), cínu (do 1000 ppm) a antimonu (do 266 ppm). V původním materiálu jsou obsahy uvedených prvků pod mezí detekce. Uvedená data pro původní a vyhořelou haldovinu však nelze mechanicky srovnávat, neboť v průběhu hoření dochází jednak ke značnému úbytku organického uhlíku (viz tab. 1), jednak se mění množství a mineralogické formy celkové síry a zřejmě i specifická hmotnost alumosilikátových fází.

Změna koncentrace stopových prvků v procesech hoření hald však může být vyjádřena ve vztahu k prvkům, jejichž obsah se v haldovině v kaustických procesech nemění. Takovými prvky jsou například titan, zirkonium nebo chróm. Z celé řady přepočtů byl vybrán přepočet podle BRAUNA a PAGELA (1990), kde jsou obsahy stopových prvků v původním a vyhořelém substrátu normalizovány (děleny) obsahy titanu:

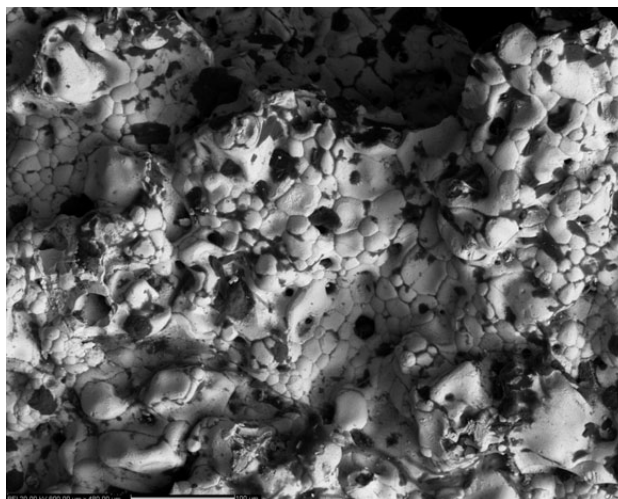
$$\text{obohacení/ochuzení (v \%)} = [(\chi/i)/(\chi_o/i_o) - 1] \cdot 100, \quad (1)$$

kde χ je koncentrace sledovaného prvku ve vyhořelé haldovině, i je koncentrace refraktorního prvku (titanu) ve vyhořelé haldovině, χ_o je koncentrace sledovaného prvku v původní haldovině a i_o koncentrace refraktorního prvku v původní haldovině.

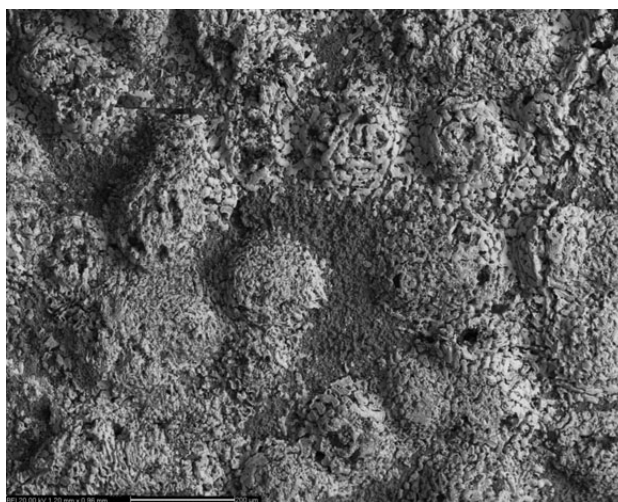
Relativní změna koncentrací stopových prvků je vyjádřena v procentech (obr. 3). Z obrázku vyplývá, že v procesech hoření dochází v povrchové vrstvě vyhořelé haldy



Obr. 4. Jehlicovitý agregát slitiny Pb-Sn s povlakem oxidů těchto prvků, délka cca 1,25 mm; snímek v odražených elektronech. Foto J. Malec.



Obr. 5. Část kůry anglesitu, velikost záběru 0,60 × 0,48 mm; snímek v odražených elektronech. Foto J. Malec.



Obr. 6. Detail krystalické kůry anglesitu na vypáleném úlomku horniny, velikost záběru 1,20 × 0,96 mm; snímek v odražených elektronech. Foto J. Malec.

Tabulka 2. Obsahy uvedených prvků (ppm) v sušině listů bříz a buků na haldách a v listech břízy na nekontaminované půdě v jejich okolí

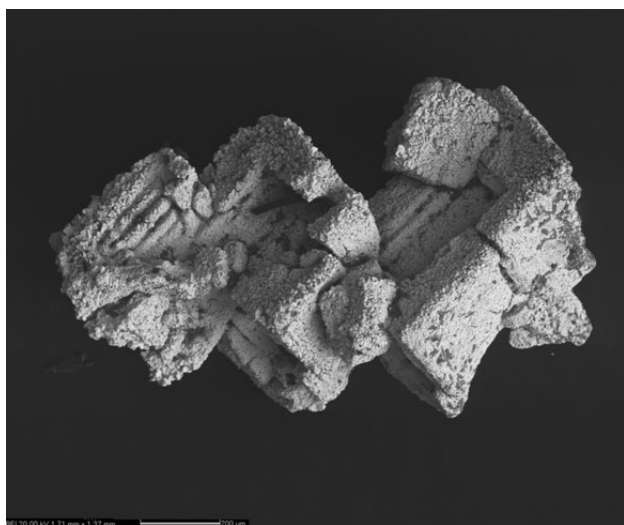
dokumentační bod č.	listy	As	Cd	Cu	Mo	Pb	U	Zn
1	břízy, haldy	8,8	5,9	5,8	0,32	2,7	0,030	1700
2	břízy, haldy	9,2	4,6	5,5	0,27	1,5	0,012	1300
6	břízy, haldy	9,6	2,9	6,5	0,35	1,3	0,023	2600
7	břízy, haldy	4,5	1,6	5,1	1,1	0,85	0,011	570
4	buku, haldy	0,14	0,01	0,41	0,045	1,1	0,023	37
5	buku, haldy	0,068	0,057	0,56	0,026	1,9	0,053	98
8	břízy, referenční nekontaminovaná půda	0,95	0,42	0,54	0,22	1,1	0,010	222

k extrémnímu zvýšení obsahu kadmia a k výraznému zvýšení obsahů arzenu a olova. Překvapivě vysoké je i obohacení vyhořelé haldoviny uranem. Na druhé straně se velmi málo zvyšují obsahy „refraktorních prvků“, tj. chrómu, mědi, niklu a zirkonia. Obsahy rtuti ve vyhořelém substrátu jsou nižší než v původním haldovém materiálu, a to pro vysokou těkavost tohoto prvku i za nízkých teplot.

Vyhořelá haldovina obsahuje 784 mg/kg těžkých minerálních fází, přičemž asi polovinu objemu koncentrátu tvoří minerály Pb a druhou polovinu oxidy Fe. V koncentrátu byly zjištěny: jehlicovité agregáty olova, cínu a slitiny s proměnlivým zastoupením Pb a Sn (obr. 4), galenit, oxid Pb-Sn, oxid Pb-Zn-As, bílý a červený oxid Pb, oxid Sn, anglesit, kovový selen, selenát nebo selenit Pb, Fe-oxidy (pravděpodobně magnetit a hematit) s proměnlivými příměsmi Cu, V, Zn a As; ve stopovém množství byla nalezena neurčená zelená fáze Cu-As-O. Nejvíce se vyskytují anglesit (bělavé kostrovité krystaly nebo kúry – obr. 5 až 7) a magnetit s hematitem.

Stopové prvky v humusu

Obsahy stopových prvků v humusu všeobecně kopírují vysoké obsahy kovů ve vyhořelé i nevyhořelé haldovině



Obr. 7. Kostrovitý agregát anglesitu, patrně pseudomorfóza po galenitu, velikost cca 1 mm; snímek v odražených elektronech. Foto J. Malec.

(tab. 1). Podobně jako při srovnání původních a vyhořelých substrátů nelze obohacení humusové vrstvy popsat prostým srovnáním dat. To proto, že množství organického uhlíku v humusové vrstvě je daleko vyšší ve srovnání se substrátem. Navíc, množství kovů vázaných na organickou složku humusu je silně zkruslováno přítomností anorganické frakce. Skutečné obohacení či ochuzení humusu stopovými prvky je proto na obr. 2 vyjádřeno po normalizaci jejich obsahů obsahy titanu v obou typech materiálu – v matečném substrátu a humusu (obr. 8) – s použitím rovnice 1. Spolu s humusem odebíraným na různých místech haldy byly odebrány vzorky humusu z nekontaminované půdy ve stejné oblasti. Z obrázku 8 vyplývá, že většina prvků v půdním humusu této nekontaminované půdní půdy je ve srovnání se substrátem odebíraným z hloubky 5–25 cm silně obohacena o Cd, Cu, Hg, Pb a Zn, méně Mo, Ni, Th a U. Naopak obsahy refraktorních prvků (Cr, Zr) jsou v substrátu a humusu po normalizaci titanem přibližně stejné. Znamená to, že chróm ani zirkonium nevstupují do metabolismu rostlin a k jejich hromadění v organické složce humusu nedochází. Jinými slovy, jejich množství je závislé pouze na množství anorganické fáze v humusové vrstvě.

Ve srovnání s přirozeným půdním profilem je stupeň obohacení humusu stopovými prvky na haldě (v porovnání s jejich obsahy v haldovině) nižší (obr. 8). Ve srovnání se substrátem dochází v humusu pouze k výrazné akumulaci kadmia a zinku, u většiny dalších prvků je humus stopovými kovy vzhledem k substrátu ochuzen. Obsahy „refraktorních prvků“, například chrómu nebo zirkonia, jsou v humusu i v substrátech zhruba stejné. Zvláštní výjimku tvoří rtuť, která je silně obohacena v humusu nevyhořelé části haldy. To proto, že obsah rtuti v kausticky postižené části haldy je nízký.

Obsahy stopových prvků v listech bříz a buků

Vzhledem k tomu, že halda je porostlá převážně monokulturou bříz a ojedinělými buky, byly koncentrace stopových prvků studovány v listech uvedených dřevin. Mimo haldu byly listy břízy odebrány z nedalekého referenčního bodu. Z výsledků chemických analýz (tab. 2) vyplývá, že břízy rostoucí na haldě akumulují ve svých listech, ve srovnání s referenční břízou rostoucí mimo haldu, daleko

větší množství arzenu, kadmia, mědi a zejména zinku. Zvýšené jsou i obsahy uranu a molybdenu. Ve srovnání s břízami rostoucími na haldě jsou obsahy kovů v listech buků z hald podstatně nižší (tab. 2). Je však třeba uvést, že buky rostou na haldě pouze na původním substrátu s nižšími obsahy kovů. Závislost mezi obsahy kovů v listech a jejich obsahy v substrátu je vyjádřena na obr. 9 pomocí koeficientu biogeochemického obohacení (KBO, Brooks 1972), který je poměrem obsahu kovů v listech a v půdě.

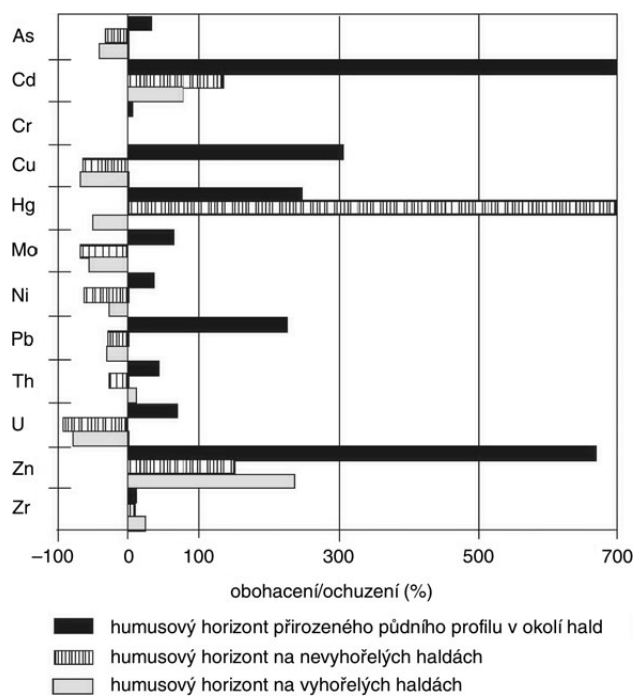
Z obrázku vyplývá, že hodnoty KBO pro listy referenční břízy jsou u všech kovů vyšší ve srovnání s břízami rostoucími na haldě. To lze vysvětlit nelineárním charakterem příjmu kovů rostlinami ve vztahu k jejich koncentracím v půdě. Při nízkých obsahích kovů v půdě je obsah kovů v rostlinných pletivech většinou přímo úměrný obsahu kovů v půdě a vzhledem k nízkým obsahům v půdě jsou hodnoty KBO vysoké. Při vysokých koncentracích obsahy kovů v půdě a v rostlinách nekorelují a vzhledem k vysokým obsahům kovů v půdě jsou hodnoty KBO nízké (GOUGH 1986). Hodnoty KBO však lze použít pro stanovení biogeochemické akumulace jednotlivých kovů u rostlin rostoucích na substrátu stejného geochemického složení. Z obrázku 9 je tedy patrné, že biogeochemická akumulace jednotlivých kovů v listech břízy i v listech buků na haldě i mimo ni roste v pořadí:



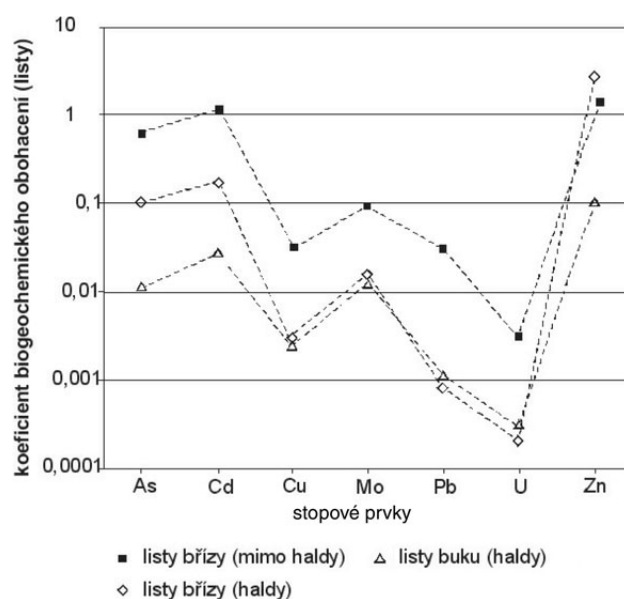
Vysoké hodnoty KBO u zinku je možno vysvětlit tím, že tento prvek je pro výživu rostlin esenciální. Nízké hodnoty u uranu a olova jsou zřejmě způsobeny jejich nízkou přístupností pro metabolismus rostlin.

Přístupnost kovů pro metabolismus rostlin

V tabulce 1 jsou uvedeny obsahy kovů ve studovaných substrátech, které byly stanoveny ve výluhu HCl/HNO₃ (*aqua regia*), nebo jejich celkové obsahy stanovené rentgen-fluorescenční analýzou. Pro metabolismus rostlin je však přístupná pouze část kovů přítomných v půdách. Pro stanovení přístupné části kovů je v pedologii a environmentální geochemii používána celá řada metod, z nichž každá vypovídá o různých formách vazby kovů v půdě. Metody založené na extrakci do různých koncentrovaných roztoků chloridu vápenatého jsou používány pro stanovení absorbované části kovů. Metody založené na extrakci do komplexních organických fází (komplexon III, EDTA, DTPA) modelují vliv organických kyselin vylučovanými kořeny rostlin na rozpustnost kovů. Pro stanovení přístupnosti kovů v haldovině a ve srovnávacím půdním profilu pro metabolismus rostlin byly použity jak metody extrakce do roztoku chloridu vápenatého, tak metody založené na použití organických komplexních činidel. Výsledky vyjádřené v obr. 10 ukazují, že přístupnost zinku a kadmia pro metabolismus rostlin je velmi vysoká (kovy jsou snadno desorbovány nebo vytvářejí organické komplexy). Tomu odpovídají i vysoké hodnoty KBO pro

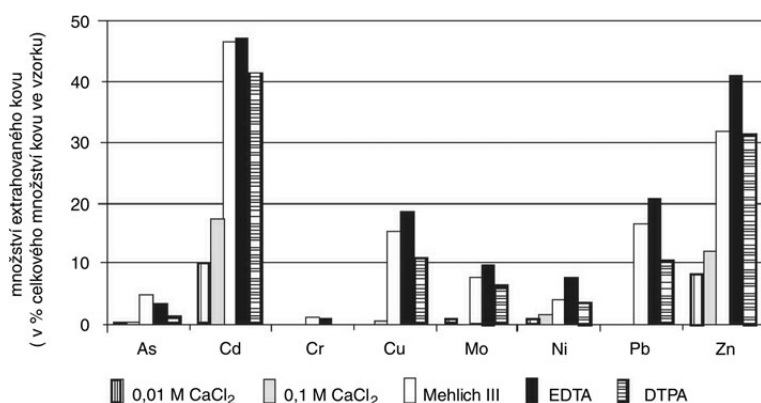


Obr. 8. Obohacení/ochuzení humusové vrstvy na haldách a ve srovnávacím humusové vrstvě přirozeného půdního profilu v jejich okolí vzhledem k substrátu. Obsahy kovů normalizovány titanem.



Obr. 9. Koeficienty biogeochemického obohacení listů břízy a buků rostoucích na haldách a listů břízy rostoucí na přirozeném půdním profilu v jejich okolí.

listy buku i břízy. Vzhledem k tomu, že humusová vrstva na haldě do značné míry kopíruje obsahy stopových prvků ve vegetaci, není překvapující silné obohacení humusu oběma kovy (obr. 2). Poměrně vysoká přístupnost olova (obr. 4) však neodpovídá nízkým koeficientům KBO pro studované rostlinné materiály. Znamená to, že vstup olova do listů buků a břízy není omezen jeho rozpustností v půdních roztocích, ale obrannými fyziologickými bariérami rostlinných tkání (BERRY 1986, ROSS 1996).



Obr. 10. Množství kovů přístupných pro metabolismus rostlin (v procentech jejich celkového množství v haldovině a ve srovnávací půdě) stanovené různými extrakčními metodami.

Závěr

Materiál haldy na opuštěném ložisku Rybníček obsahuje zvýšená množství uranu a dalších těžkých kovů. Při hoření haldy došlo k mobilizaci celé řady kovů, zejména Cd, As, Pb, U a Zn, a k jejich akumulaci v okolí výstupu spalin v apikální části vyhořelých partií. Vyhořelé části haldy obsahují i vysoké koncentrace Se, Ag, Sn a Sb. V materiálu vyhořelé části haldy byla identifikována řada minerálů olova, cínu, selenu a řada slitin.

Břízy a buky rostoucí na haldě extrahují kovy z haldoviny v různé míře. Nejméně je extrahován uran a olovo, nejvíce zinek a kadmium. Vysoké obohacení listů zinkem a kadmiiem je možno vysvětlit jejich vysokou přístupností pro metabolismus stromů, v případě zinku i jeho nezbytností pro rostlinný metabolismus.

Opad bříz a buků je podstatným zdrojem humusové vrstvy, která se v průběhu téměř padesáti let na haldě vytvořila. Obsahy kovů v humusové vrstvě na haldě jsou daleko vyšší než obsahy kovů v humusové vrstvě srovnávacího přirozeného profilu. Ve srovnání s haldovinou obsahuje humus na haldě vyšší obsahy zinku a kadmia, obsahy ostatních prvků jsou nižší. Ochuzení humusové vrstvy kovy vzhledem k substrátu není stejné; snižuje se v pořadí: U→Mo, Cu, Ni→Pb→As. Znamená to, že v budoucnosti se bude koncentrace olova a arzenu v humusové vrstvě zvyšovat rychleji než koncentrace uranu, molybdenu, mědi a niklu. Z environmentálního hlediska je důležité, že

humusová vrstva, která postupně na vyhořelých i nevyhořelých částech haldy vzniká, je důležitým stabilizačním faktorem, který snižuje rychlost eroze haldových materiálů a vymývání jemných podílů a omezuje rozpustnost kovů v cirkulujících roztocích vzhledem k jejich silné vazbě organickými složkami humusu.

Práce byly provedeny v rámci projektu Odboru ochrany horninového a půdního prostředí Ministerstva životního prostředí České republiky Vliv těžby, úpravy a zpracování nerostných surovin na životní prostředí.

Literatura

- ARAPOV, J. A. – BOJCOV, V. J. – ČESNOKOV, N. I. – HALBRŠTÁT, J. – NOVÝ, V. – ŠORF, F., ed. (1984): Československá ložiska uranu. – Čs. uran. prům., Praha, 350 str.
- BERRY, W. L. (1986): Plant factors influencing the use of plant analysis as a tool for biogeochemical prospecting. In: D. CARLISLE, W. BERRY, I. R. KAPLAN, R. WATTERSON, Eds: Mineral exploration: Biological systems and organic matter. – Prentice-Hall, Englewoos Cliffs, New Jersey, 14–32.
- BRAUN, J. J. – PAGEL, M. (1990): U, Th, and REE in the Akongo lateritic profile (SW Cameroon). – Chem. Geol., 84, 357–359.
- BROOKS, R. R. (1972): Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration. – Harpen & Row, New York, 292 str.
- GOUGH, L. P. (1986): Vegetation zonation, metal stress, and mineral exploration. In: D. CARLISLE, W. BERRY, I. R. KAPLAN, R. WATTERSON, Eds: Mineral exploration: Biological systems and organic matter. – Prentice-Hall, Englewoos Cliffs, New Jersey, 34–46.
- MALEC, J. (2001): Klasifikace a možnosti využití starých odvalů na Trutnovsku. – MS Čes. geol. služba – Geofond (P 104344).
- PADĚRA, Z. (1964): Nález nerostů s podstatným obsahem olova na hořících haldách od Bečkova u Trutnova. – Čas. Mineral. Geol., 9, 4, 479–480.
- PAULIŠ, P. – KOPECKÝ, S. – ČERNÝ, P. (2007): Uranové minerály České republiky a jejich naleziště, 2. část. – Vyd. Kutná, Kutná Hora.
- PEŠEK, J. et al. (2001): Geologie a ložiska svrchnopaleozoických limnických pánví České republiky. – Čes. geol. úst. Praha.
- ROSS, S. H. (1996): Toxic metals in soil-plant system. – John Wiley & Sons, Chichester–New York, 469 str.
- SPUDIL, J. et al. (1996): Závěrečná zpráva o ložisku – VUD. Opuštěná důlní díla. – MS Čes. geol. služba – Geofond (P 88333).
- TÁSLER, R., ed. (1979): Geologie české části vnitrosudetské pánve. – Ústř. úst. geol. Praha.