

Využití spektroradiometrických měření pro identifikaci kyselých zvětralinových substrátů – studie ze Sokolovské pánve

Utilization of spectroradiometric measurements for identification of acid weathered substrates – Case study from the Sokolov basin

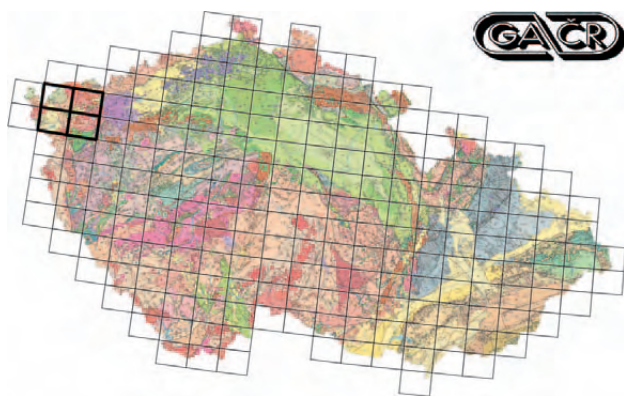
VERONIKA KOPAČKOVÁ¹ – STEPHANE CHEVREL² – ANNE BOURGUIGNON² – PETR ROJÍK^{1,3}

¹ Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1; veronika.kopackova@geology.cz

² BRGM, Avenue Claude Guillemin, BP 6009, 45060 Orleans Cedex 2, France

³ Sokolovská uhelná, a. s., Staré nám. 69, Sokolov

(11-12 Kraslice, 11-14 Cheb, 11-21 Karlovy Vary, 11-23 Sokolov)

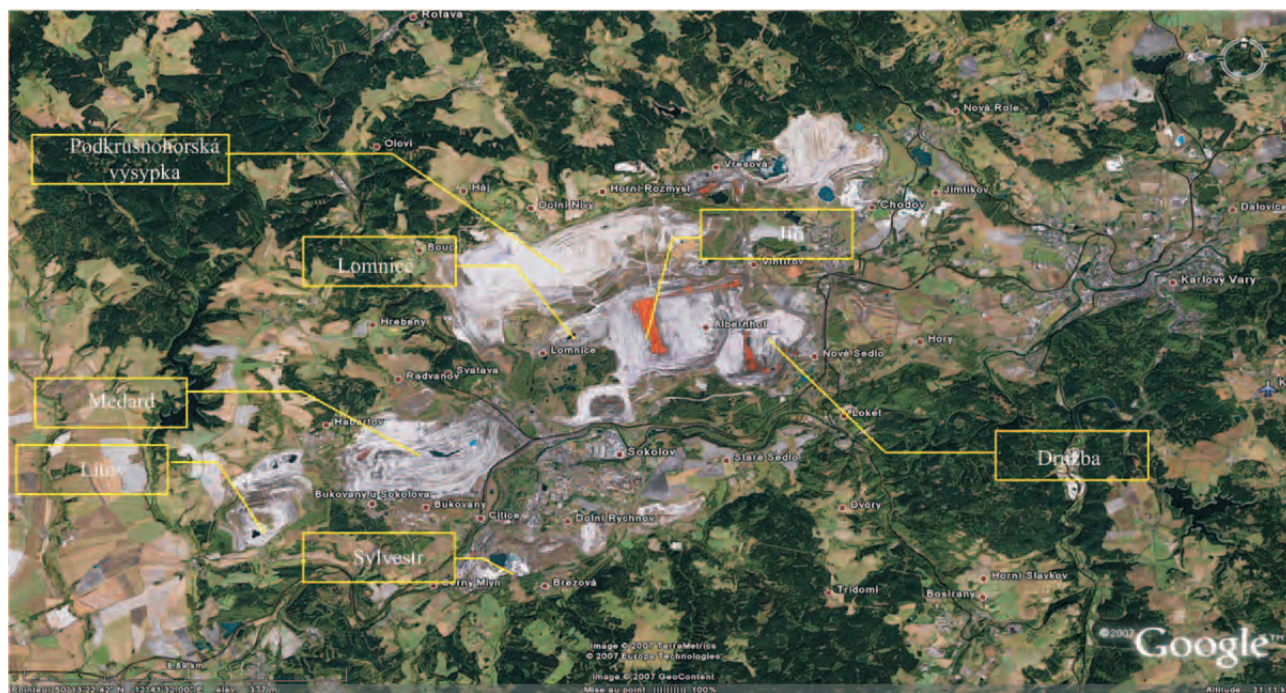


Key words: acid mine drainage (AMD), spectroradiometry, ASTER, mining waste, Sokolov open-pit mine

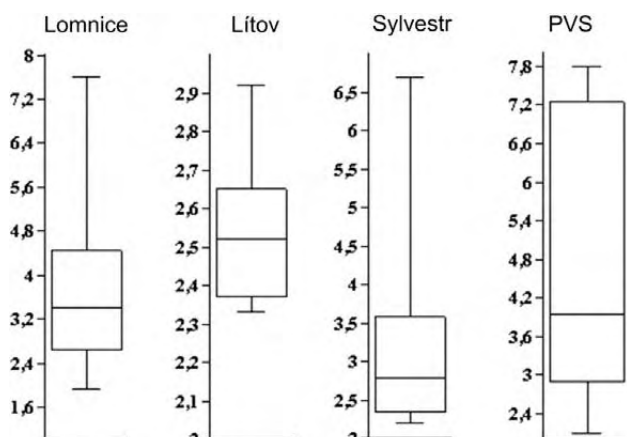
Abstract: Mineral spectroradiometry, using both airborne or spaceborne sensors and ground measurements, represents an al-

ternative to conventional methods and efficient way to characterize mining sites together with the surrounding environment and assess the potential for mapping acid “hot spots”. High-altitude spectroradiometry (ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer satellite data) together with ground-based spectroradiometry (ASD Filedspec 3® spectroradiometer) were applied in order to define the capability for identifying the locations of the most significant sources of acidification at the Sokolov open-pit mine site. First results comparing the maps derived from ASTER imagery with the field investigations demonstrated the ability of spectral remote sensing to map such mineral species as secondary iron minerals and organic component (e.g. humic acid) as well.

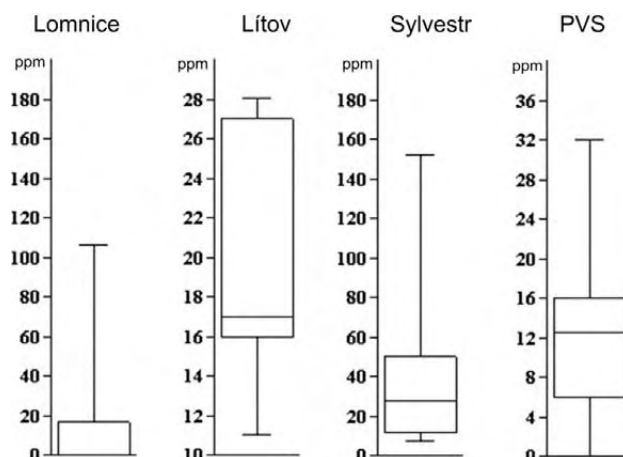
Různé druhy povrchů definované svým charakteristickým chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi je možné identifikovat pomocí spektroskopických (také nazývaných spektroradiometrických) metod, které mohou buď využívat pozemních měření, nebo vyhodnocovat data pořizovaná distančně – satelitní a letecká hyperspektrální (HS) data (hyperspektrální senzor je zařízení, které pořizuje velké množství obrazových záznamů daného území ve velmi úzkých na sebe navazujících intervalech spektra v oblasti



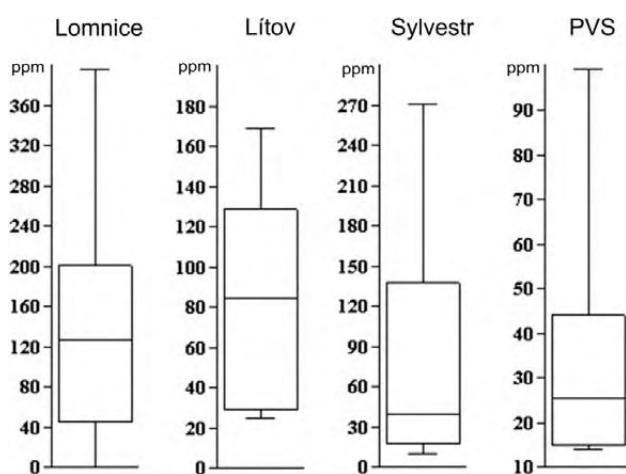
Obr. 1. Schematická mapa studované oblasti.



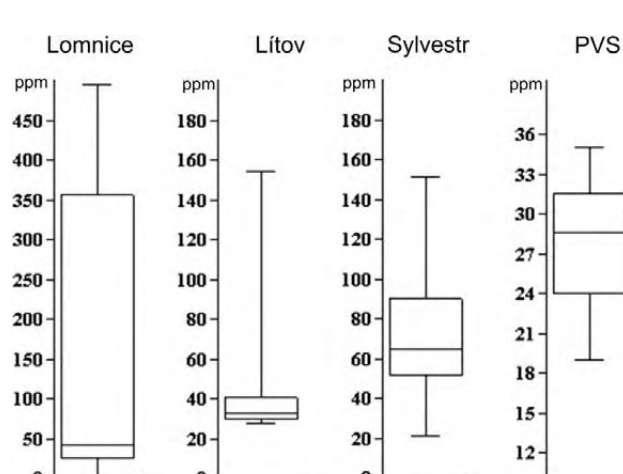
Obr. 2. Statistické zhodnocení lokalit: pH. PVS – Podkrušnohorská výsypka.



Obr. 4. Statistické zhodnocení lokalit: Hg. PVS – Podkrušnohorská výsypka.

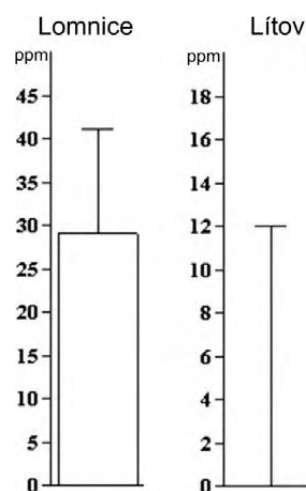


Obr. 3. Statistické zhodnocení lokalit: As. PVS – Podkrušnohorská výsypka.



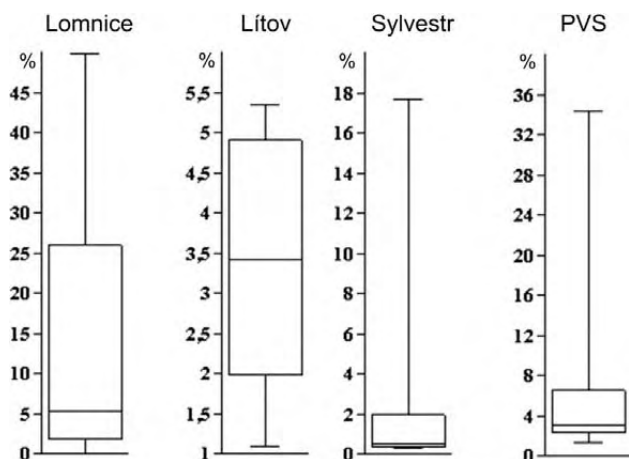
Obr. 5. Statistické zhodnocení lokalit: Pb. PVS – Podkrušnohorská výsypka.

viditelného, blízkého a středního infračerveného elektromagnetického záření). Ideální je zkombinovat oba dva druhy přístupů a pozemně pořízená měření použít pro vlastní kalibraci HS dat a jejich následnou klasifikaci. Spektroskopie měří odražené či vyzářené elektromagnetické (EM) záření (jeho zdrojem bývá nejčastěji Slunce) a jeho vlnové délky. Vztah mezi intenzitou EM záření na jisté vlnové délce pak vytváří spektrální křivku daného objektu. Každý objekt tak může být identifikován podle tzv. spektrálních projevů, které zahrnují: a) spektrální absorpce, kdy jsou některé vlnové délky pohlcovány a tato místa vykazují slabou odrazivost, b) selektivní odraz, ke kterému dochází na určité vlnové délce, c) selektivní vyzářování objektu, které může být vyšší i nižší. V oblasti hyperspektrálních (HS) a spektroskopických aplikací bylo v minulosti v rámci České republiky provedeno několik studií zabývajících se studiem zdraví vegetace. Pilotní studie vyhodnocovala stav jehličnanů v Krušných horách (Entcheva-Campbell et al. 2004), další dvě HS náletové kampaně byly provedeny na testovací lokalitě Bílý Kříž v Moravsko-slezských Beskydách v letech 2004 a 2006 využívající senzor AISA Eagle VNIR (Ústav systémové biologie a ekologie AV ČR, Brno). V roce 2007 byla navázána bilaterální spolupráce mezi



Obr. 6. Statistické zhodnocení lokalit: U. U se vyskytoval častěji pouze na lokalitě Lomnice, sporadicky i na lokalitě Lítov.

pracovišti dálkového průzkumu Země (DPZ) České geologické služby (ČGS) a francouzské geologické služby (BRGM) zaměřující se na geologické aplikace spektrometrie a analýzu HS dat. BRGM poskytlo pro terénní práce



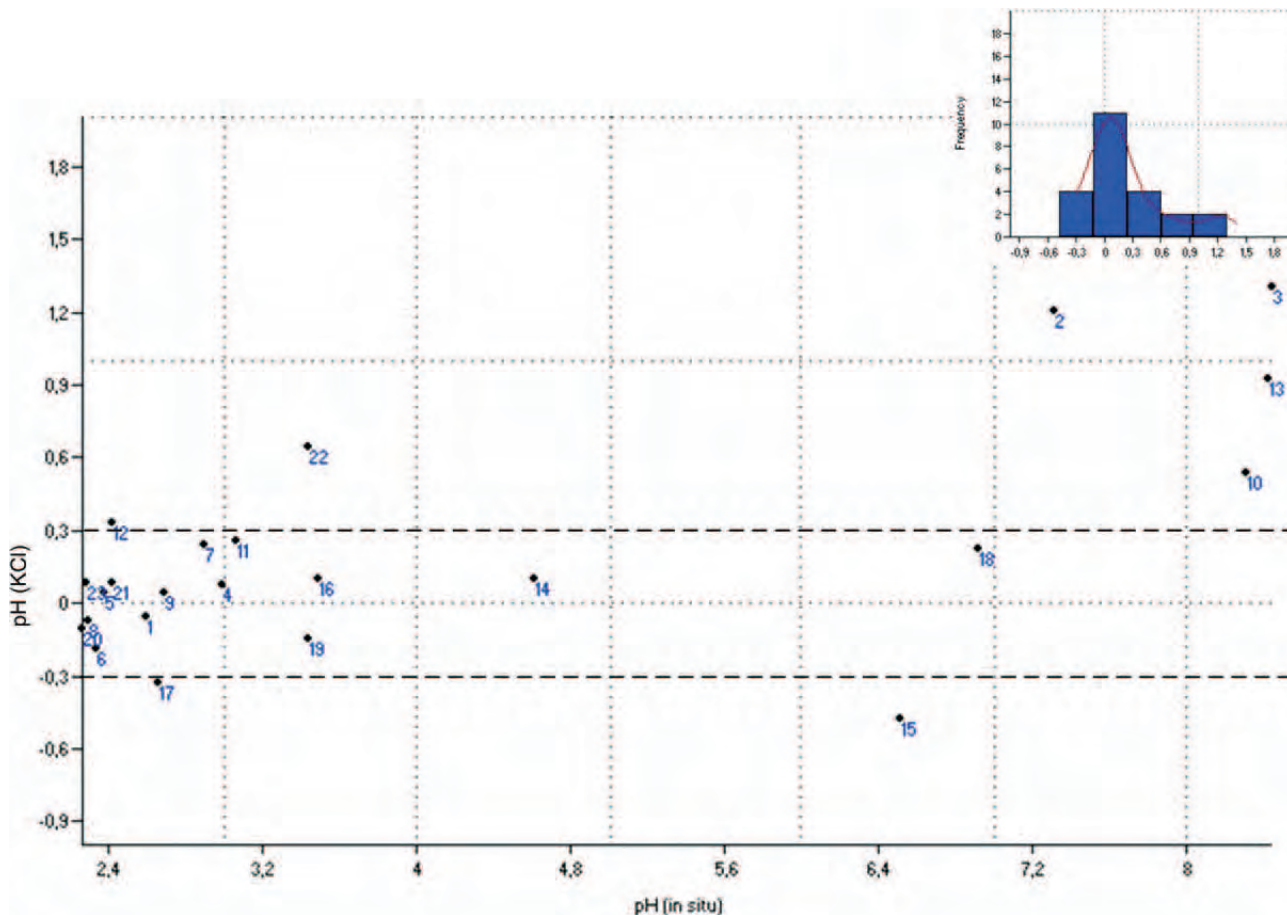
Obr. 7. Statistické zhodnocení lokalit: TOC.

i nezbytné přístrojové vybavení, a to pozemní spektrometr ASD FieldSpec 3® (Analytical Spectral Device). Tento přístroj pořizuje spojitý záznam v rámci 2151 pásem v rozmezí 0,4–2,5 μm elektromagnetického (EM) spektra, tedy vedle oblasti viditelného (0,4–1,0 μm) i v oblasti blízkého infračerveného a krátkovlnného infračerveného spektrálního regionu (1,0–2,5 μm). Cílem společných aktivit bylo vytvoření tzv. spektrálních knihoven horninových povrchů Sokolovské pánve, jejich následné využití pro klasifikaci satelitních dat (ASTER) a plošné vymezení míst povrchové

acidifikace (mezinárodní anglický termín Acid Mine Drainage – AMD). Dosavadní výsledky této studie shrnují publikace Chevrel et al. (2008a, b) a byly prezentovány na mezinárodním geologickém kongresu v Oslu (Kopačková et al. 2008).

Studované území

Sokolovská pánev, oligocenního až miocenního stáří, zaujímá 8–9 km širokou a ca 36 km dlouhou depresi mezi Krušnými horami na SZ a Slavkovským lesem na JV v západních Čechách (obr. 1). Terciární vulkanická a sedimentární výplň pánve leží na krystalinických horninách stáří svrchně proterozoického až karbonského (oherské a krušnohorské krystalinikum, krystalinikum Slavkovského lesa, karlovarský pluton). Výplň dosahující mocnosti až 400 m tvoří z 60 % vulkanická rezidua. Nejstarší součástí výplně je starosedelské souvrství s mocností až 50 m. Jde o pestrobarevné kaolinické jíly a písky, tj. splachy zvětralín z plochých elevací, a druhotně prokřemenělé pískovce a křemence, místy s polohami slepenců. Vulkanické horniny oligocenního/miocenního stáří (extenze a s ní spojená vulkanická aktivita – 1. fáze) jsou v novosedelském souvrství, které spočívá diskordantně na svém podloží, často postiženém zvětráváním a kaolinizací; 2. fází vulkanické aktivity v této oblasti tvoří horniny raně miocenního stáří, součást



Obr. 8. Chyba mezi pH měřením in situ a pH změřeným laboratorně.

sokolovského souvrství (Rojík 2004, Chlupáč et al. 2002). Pánev je ohraničena jz.-sv. zlomovým systémem, v oblasti se dále vyskytuje zlomový systém kolmý na tento směr (JV-SZ). Lignit se nachází pouze v z. části pánve, a to ve třech uhelných slojích, které jsou součástí novosedelského souvrství.

Sloj Josef (až 5 % S a 60–70 ppm As) je nejnižším uhelným horizontem, sloj Anežka je o něco mladší a sloj Antonín je nejsvrchnější uhelný horizont (průměr 0,9 % S). Sloje Josef a Anežka byly těženy hlavně v lomu Medard-Libík, sloj Antonín je těžena v lomech Jiří a Družba. Sloje jsou překryty cyprisovými souvrstvími (spodní miocén), které tvoří expanzní jílovce složené především z kaolinitu, illitu a montmorillonitu (Rojík – Murad 2003).

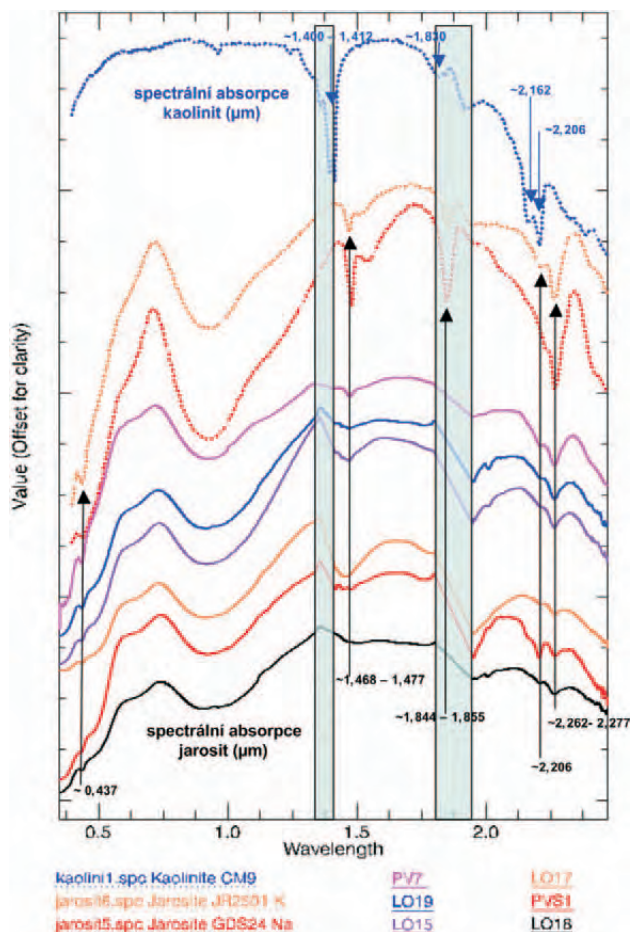
Dlouhodobá a intenzivní těžba v tomto regionu významně ovlivňuje stav a vývoj lokálních ekosystémů, a to nejen v místech bezprostředně sousedících s vlastními těžebními prostory. Vedle přímých vlivů vlastní těžby vedoucích ke změně rázu krajiny patří k hlavním činitelům narušujícím celkovou stabilitu území i vedlejší jevy související s těžbou: a) povrchová acidifikace jako výsledek zvětrávacích procesů uhelného materiálu obsahujícího pyrit, b) migrace nebezpečných látek ve všech složkách životního prostředí (migrace těžkých kovů a solí jako výsledek interakce mezi půdou, čerpanou důlní vodou a vodou povrchovou).

Analytické práce

Dvoutýdenní terénní etapy se uskutečnily v letech 2007 (začátek září) a 2008 (přelom července a srpna). Vzhledem k nepříznivému počasí v prvním roce (měření pozemním spektrometrem vyžaduje bezoblačné a slunečné podmínky) proběhla především terénní rekognoskace včetně odběru typových vzorků hornin. Horninové vzorky byly následně změřeny spektrometrem v laboratorních podmínkách a bylo určeno mineralogické zastoupení metodou práškové rtg.-difrakce pomocí vyhodnocení difrakčních záznamů (Philips X'pert System).

V následujícím roce příznivé počasí umožnilo provést rozsáhlá spektrometrická měření in situ pozemním spektrometrem ASD FieldSpec 3® hlavních litostratigrafických typů Sokolovské pánve a smíšeného materiálu výsypek. Z celkem pořízených ca 100 spektrometrických dokumentačních bodů bylo u čtyřiceti provedeno měření pH in situ přístrojem pH-212, Voltcraft (40 měření na zvětralínovém substrátu, dále bylo provedeno 30 měření u povrchových vod). U padesáti vybraných dokumentačních bodů byly odebrány horninové vzorky na následné laboratorní analýzy.

Každý spektrometrický dokumentační bod reprezentoval ve výsledku průměr z alespoň tří bodových měření rozmístěných do vzdálenosti několika metrů od sebe v rámci petrograficky homogenního celku. Poté bylo měřeno pH in situ a u vybraných dokumentačních bodů odebrán horninový vzorek (maximálně do hloubky 0,5 cm svrchní vrstvy) na následující laboratorní analýzy: a) rtg.-difrakce na práškovém difraktometru Philips X'pert System, b) stopové prvky na RFA (rentgenofluorescenční analýza) spektrometru

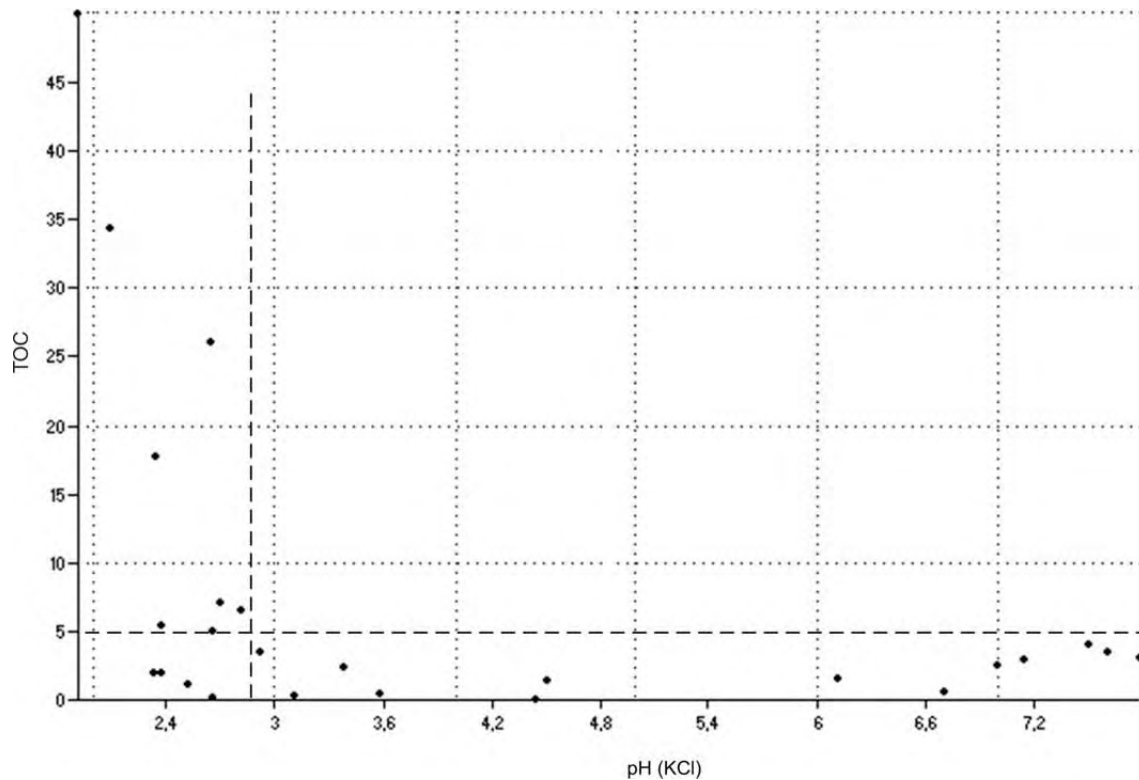


Obr. 9. Spektrální absorpce a selektivní odraz typových minerálů.

(Innov-x Alpha), c) pH výluh v KCl, d) nepřímé stanovení minerálního a organického uhlíku (TOC) podle ČSN ISO 10 694. Před vlastními laboratorními analýzami byly všechny vzorky homogenizovány (drčení, kvartace a pulverizace na analytickou jemnost zrnitostní frakce < 2 mm).

Výsledky

Terénní rekognoskace prokázala, že půdy v již opuštěných lomech jsou často velmi kyselé (obr. 2) – např. lokalita Lítov vykázala pH medián 2,5 a maximální pH na této lokalitě dosáhlo hodnoty 2,91. Obrázky 2–7 ukazují porovnání obsahu stopových prvků, půdního pH a TOC ze sledovaných lokalit. Lokalita Lítov vykazuje vysoké koncentrace As, Lomnice pak vedle vysokých koncentrací As také vysoké obsahy Hg, Pb a TOC a vyskyt U. Vysoké obsahy Hg a Pb byly dále nalezeny i ve vzorcích odebraných na lokalitě Sylvestr. Na obr. 8 je vynesena chyba mezi pH měřeními in situ a pH změřeným laboratorně na homogenizovaných vzorcích; převážně se pohybovala v rozmezí $\pm 0,3$ pH. Vyšší chyby v měření pH in situ se vyskytují u substrátů s pH > 7. Lze předpokládat, že pokud se měřené pH pohybuje ve velmi širokém rozmezí jako v tomto případě (pH 2–9), lze přesnějších měření dosáhnout pouze častější kalibrací přístroje, než doporučuje výrobce.



Obr. 10. Vztah mezi TOC a pH.

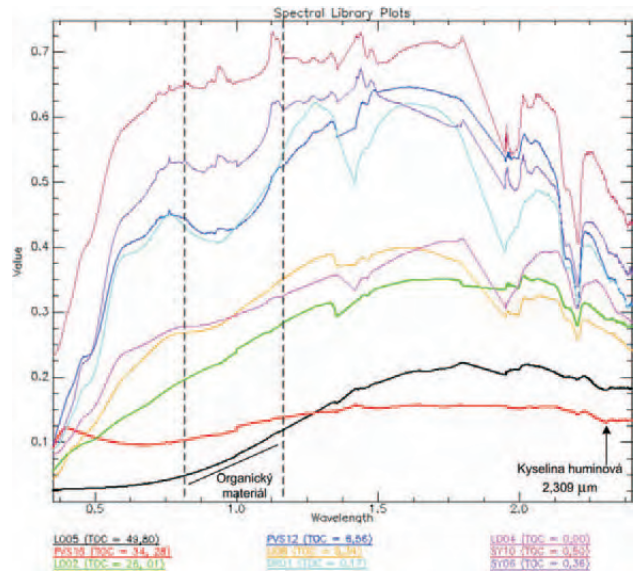
Tabulka 1. Lomnice: matice lineárních korelačních koeficientů u vybraných stopových prvků

Lomnice	pH (KCl)	Fe	Cu	Zn	As	Hg	Pb	U	TOC
pH (KCl)	0,00								
Fe	0,15	0,00							
Cu	-0,14	0,64	0,00						
Zn	0,80	0,02	-0,57	0,00					
As	-0,60	-0,14	0,14	-0,73	0,00				
Hg	-0,63	-0,24	0,18	-0,80	0,98	0,00			
Pb	0,66	-0,11	-0,34	0,79	-0,96	-0,93	0,00		
U	0,14	-0,56	-0,91	0,64	-0,47	-0,48	0,61	0,00	
TOC	-0,65	-0,28	0,18	-0,82	0,97	1,00	-0,91	-0,46	0,00

Tabulka 2. Sylvestr: matice lineárních korelačních koeficientů u vybraných stopových prvků

Sylvestr	pH (KCl)	Fe	Cu	Zn	As	Hg	Pb	TOC
pH (KCl)	0,00							
Fe	0,52	0,00						
Cu	0,54	0,89	0,00					
Zn	0,39	-0,53	-0,25	0,00				
As	-0,55	-0,22	-0,61	-0,56	0,00			
Hg	-0,50	-0,03	-0,44	-0,71	0,98	0,00		
Pb	-0,11	0,60	0,21	-0,92	0,64	0,78	0,00	
TOC	-0,46	-0,09	-0,51	-0,63	0,99	0,99	0,73	0,00

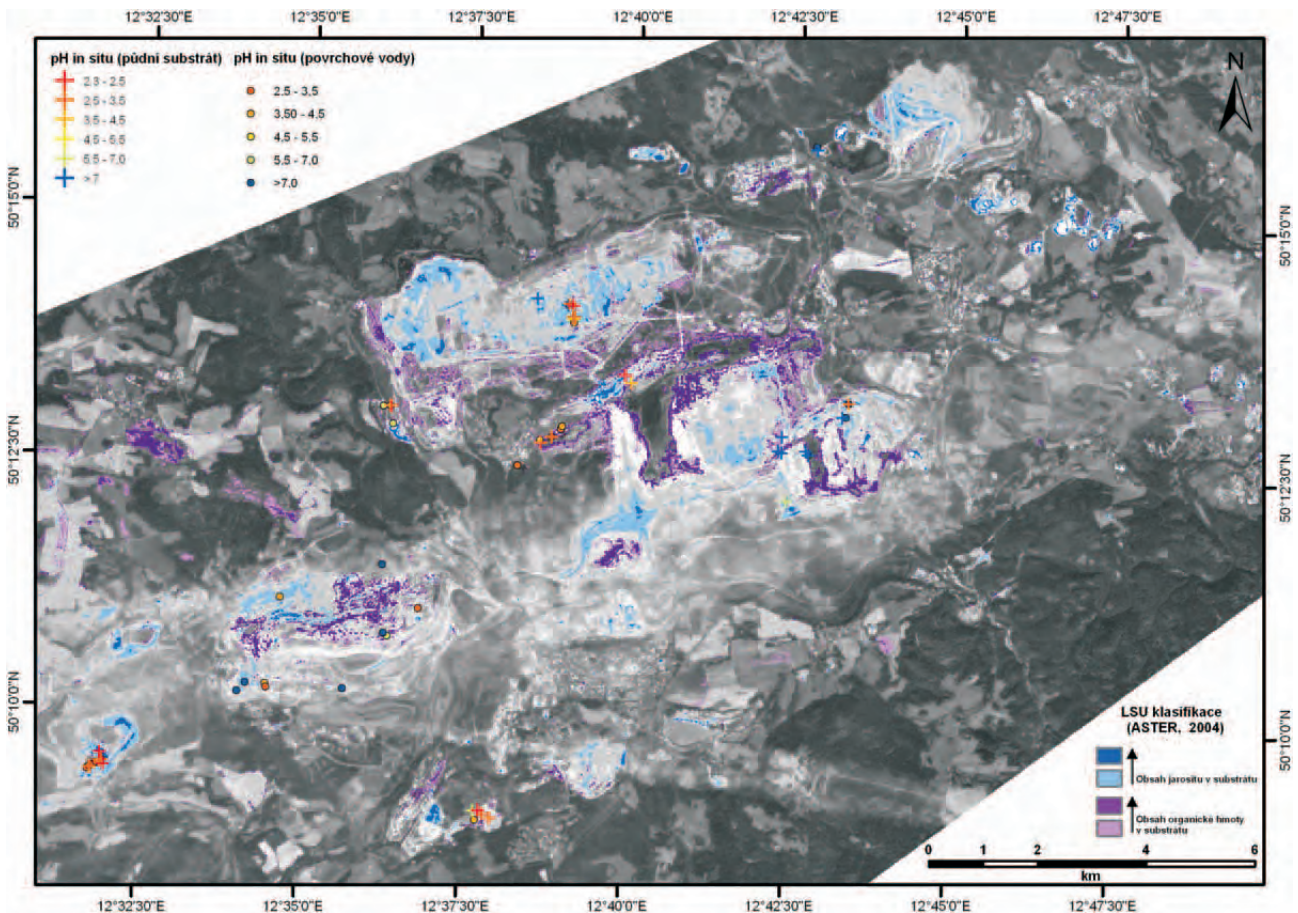
Proces sorpce/desorpce stopových prvků v půdách ovlivňují především faktory: a) pH a Eh; b) podíl jemné frakce; c) obsah organické hmoty; d) přítomnost oxidů a hydroxidů Fe, Mn a Al; e) činnost mikroorganismů. Lze se domnívat, že rozdíly v distribuci stopových prvků v rámci čtyř hodnocených lokalit odráží tedy především jejich rozdílnost v chemickém složení a ve fyzikálních vlastnostech materiálu, který tvoří vlastní výsypky. Lítov je lokalita, která se vyznačuje extrémní aciditou. Její materiál obsahuje jílové minerály (převážně kaolinit a illit) v daleko menší míře, než je tomu u ostatních tří lokalit, mají zde pouze sekundární zastoupení. Jako majoritní minerál se vyskytuje pouze křemen, goethit a jarosit jsou přítomny v akcesorické formě, organická složka většinou pod 5 %. Naproti tomu Lomnice je lokalitou s velmi vysokým podílem organického materiálu (většinou v desítkách procent), kaolinit spolu s křemenem jsou majoritní minerální složkou. Minerály illit a goethit se vyskytují sekundárně, jarosit akcesoricky. U Podkrušnohorské výsypky (PVS) jsou majoritní minerály kaolinit, křemen a anatas, sekundární goethit a illit, siderit a pyrit. Jarosit je přítomen buď v sekundární, nebo akcesorické formě, variabilní organická složka se vyskytuje od nízkých obsahů až po velmi vysoké (řádově od jednotek do desítek procent). Sylvestr tvoří materiál, který v převážné míře obsahuje pouze křemen a kaolinit, v sekundární formě se zde vyskytuje illit, popř. siderit a anatas, jarosit se téměř nevyskytuje. Podíl organické složky je velmi variabilní a



Obr. 11. Spektrální křivky vzorků s variabilním obsahem minerálního a organického uhlíku (TOC).

pohybuje se od velmi nízkých obsahů (řádově desítky %) až po velmi vysoké (řádově desítky %).

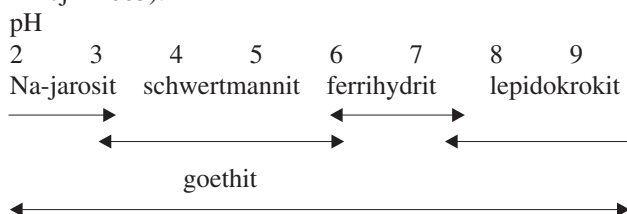
Vypočítané korelační koeficienty pro vybrané lokality (tab. 1 a 2) ukazují, že As a Hg se přednostně váží na organickou hmotu (zde přímo korelovanou s TOC) a obsahy



Obr. 12. Porovnání pH naměřeným in situ s LSU klasifikací satelitních dat ASTER.

těchto prvků narůstají s klesajícím pH a narůstajícím obsahem organické hmoty. Tento jev je velmi zřetelný v lomu Lomnice (tab. 1), kde hodnoty korelačních koeficientů po zaokrouhlení dosahují hodnot blízkých se 1. Na lokalitě Sylvestr (tab. 2) výskyt Pb také vykazuje poměrně vysokou kladnou korelaci (~ 0,78) s obsahem organické hmoty.

Studie dále ukázala, že kyselý zvětralínový substrát, který vzniká v místech aktivní i bývalé povrchové těžby, může být identifikován pomocí spektrálních charakteristik (spektrální absorpce a selektivního odrazu) indikativních minerálů (obr. 10) vznikajících oxidací pyritu, kdy minerály jako jarosit a Na-jarosit se vyskytují v podmínkách půdního pH < 3 a schwertmannit v rozsahu pH 3,0–5,5 (Murad – Rojík 2003):



Vedle zmíněného schématu, který využívá sekundární minerály (jarosit, schwertmannit, goethit) jako indikátory acidifikace, se dále ukázalo, že také vysoký obsah organické hmoty (TOC > 5 %) je typický pro velmi kyselé půdní prostředí (obr. 10). Studium spektrálních křivek vzorků s vysokým obsahem TOC se podařilo identifikovat kyselinu huminovou (obr. 11). Spektrální křivka vzorků s vysokým obsahem kyseliny huminové má plochý průběh mezi 0,8–1,2 μm a charakteristickou spektrální absorpcí na 2,309 μm , způsobenou alifatickou vazbou C-H (Ben-Dor et al. 1997).

Pomocí metody LSU (Linear Spectral Unmixing; algoritmus zohledňující vícesložkový/směsný obsah pixelu v lineárním poměru) byly ze satelitních dat ASTER klasifikovány kyselá zvětralínové povrchy obsahující jarosit a kyselinu huminovou. Přímé porovnání s pH naměřeným in situ ukazuje velmi dobrou prostorovou shodu (obr. 12).

Závěr

Dosavadní výsledky vycházející z této studie prokázaly velký potenciál v aplikaci spektroskopických (spektrometrických) metod do oblasti detekce a identifikace rizikového materiálu, který vzniká v důsledku povrchové těžby ligni-

tu. Vedle indikativních minerálů acidity prostředí (jarosit, Na-jarosit, schwertmannit a goethit) lze detekovat ve směsném materiálu a plošně vymežit také přítomnou organickou hmotu. Vysoký obsah organické hmoty (> 5 %) je charakteristický pro kyselý povrchový materiál výsypek (pH < 3) a – jak vyplývá ze statistického vyhodnocení – sehrává dále i klíčovou roli v sorpci toxických prvků As a Hg.

Poděkování. Práce byly provedeny v rámci projektu Odboru ochrany horninového a půdního prostředí Ministerstva životního prostředí České republiky Vlivy těžby, úpravy a zpracování nerostných surovin na životní prostředí a grantu GAČR č. 205/09/1989 Vyhodnocení environmentálních vlivů povrchové těžby postavené na analýze dat hyperspektrálního senzoru ARES.

Literatura

- BEN-DOR, E. – INBAR, Y. – CHEN, Y. (1997): The Reflectance Spectra of Organic Matter in the Visible Near-Infrared and Short Wave Infrared Region (400-2500 nm) during a Controlled Decomposition Process. – *Remote Sens. Environ.*, 61, 1–15.
- ENTCHEVA-CAMPBELL, P. K. E. – ROCK, B. N. – MARTIN, M. E. – NEEFUS, C. D. – IRONS, J. R. – MIDDLETON, E. M. – ALBRECHTOVA, J. (2004): Detection of initial damage in Norway spruce canopies using hyperspectral airborne data. – *Int. J. Remote Sens.*, 25 (24), 5557–5583.
- CHEVREL, S. – KOPAČKOVÁ, V. – BOURGUIGNON, A. – ROJÍK, P. – METELKA, V. (2008a): Application of high altitude and ground-based spectroradiometry in the monitoring of hazardous waste derived from Sokolov open-pit mine. In: RAPANTOVA, N. – HRKAL, Z., Eds: Proc. 10th Int. Mine Water Assoc. Congress, Karlovy Vary, June 2–5, 2008. – *Techn. Univ. Ostrava Publ.*, 371–374.
- CHEVREL, S. – KOPAČKOVÁ, V. – BOURGUIGNON, A. – ROJÍK, P. – METELKA, V. (2008b): Monitoring Hazardous Wastes Using Space-borne and Ground-based Spectroradiometry – Sokolov Lignite Mines: Czech Republic, Mine Closure 2008. In: FOURRIER, A. – TIBBET, M. – WEIERSBYE, I. – DYE, P., Eds: Proc. 3rd Int. Sem. Mine Closure, 14–18 October 2008, Johannesburg, South Africa. – *Australian Centre Geomatic Publ.*, 651–662.
- CHLUPÁČ, I. et al. (2002): Geologická minulost České republiky. – *Academia, Praha*, 436 s.
- KOPAČKOVÁ, V. – CHEVREL, S. – BOURGUIGNON, A. – RAJCH, M. (2008): Spectral mineral mapping utilizing high altitude and ground-based spectroradiometry: Case studies from Sokolov open-pit mine, Czech Republic, and Sechura desert, Peru. – 33rd Int. Geol. Congress, Oslo, August 6–14, 2008, session GTR-04 Hyperspectral remote sensing and image spectroscopy. CD-ROM.
- MURAD, E. – ROJÍK, P. (2003): Iron-rich precipitates in a mine drainage environment: Influence of pH on mineralogy. – *Amer. Mineral.*, 88, 1915–1918.
- ROJÍK, P. (2004): New stratigraphic subdivision of the Tertiary in the Sokolov Basin in Northwestern Bohemia. – *J. Czech Geol. Soc.*, 49/3, 173–186.