

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta Katedra  
aplikované geoinformatiky a kartografie**

**Charles University in Prague, Faculty of Science  
Department of Applied Geoinformatics and Cartography**

Doktorský studijní program: Kartografie, geoinformatika a dálkový  
průzkum země  
Ph.D. study program: Cartography, Geoinformatics and Remote Sensing

Autoreferát disertační práce  
Summary of the Ph.D. Thesis



Environmentální aplikace obrazové spektroskopie  
Hyperspectral Remote Sensing for Environmental Mapping and  
Monitoring

**Mgr. Veronika Kopačková**

Školitel/Supervisor: Doc. Jan Kolář

Praha, 2013

## Abstrakt

Předložená disertační práce se věnuje aplikaci metod obrazové spektroskopie jako moderního nástroje pro environmentální monitoring, přičemž se zaměřuje na modelování vybraných geochemických a biochemických parametrů. Disertační práce je členěna do dvou tematických celků. První z nich (kapitoly 2 a 3) je věnován aplikaci minerální a obrazové spektroskopie pro vymezení plošného výskytu povrchové acidifikace (anglický termín: AMD – Acid Mine Drainage) a modelování povrchového pH. Druhá tematická část (kapitoly 4, 5 a 6) se věnuje zhodnocení fyziologického stavu smrkových porostů.

V kapitole 2 jsou s využitím satelitních dat ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer satellite data) plošně vymezeny kyselé zvětralinové povrchy ( $\text{pH} < 4$ ), jež charakterizuje výskyt jarositu a lignitu (hnědé uhlí). Kapitola 3 se věnuje vytvoření modelu pro odhad povrchového pH odkrytých substrátů s využitím leteckých hyperspektrálních dat HyMap (07/2009). Tato studie je jednou z prvních, jež aplikuje metody obrazové spektroskopie pro kvantitativní modelování pH v prostředí povrchových dolů vyznačující se vysokou heterogenitou.

V druhé tematické části je obrazová spektroskopie aplikována do oblasti monitoringu zdravotního stavu lesních smrkových porostů, které se vyskytují v bezprostředním okolí Sokolovské pánve, avšak nejsou přímo zasaženy vlastní těžbou. Výsledně je vytvořen statistický model integrující obsah chlorofylu (Cab) s vegetačními indexy REP a SIPI, jež umožňuje vyhodnotit fyziologický stav smrkových porostů a identifikovat případný stress i u takových porostů, jež ještě nevykazují viditelné symptomy poškození (kapitola 4). V kapitole 5 je výše popsaná metoda aplikována na další sadu hyperspektrálních dat HyMap, jež byly pořízeny v následujícím roce (08/2010). Výsledky klasifikace jsou dále validovány s biochemickými parametry smrkového jehličí a asociovány s geochemickými podmínkami půdního prostředí. Klasifikací obou hyperspektrálních datových sad (HyMap 07/2009 a 08/2010), stejně jako statistickým vyhodnocením biochemických a geochemických parametrů, bylo identifikováno zatížení a vegetační stres u stejných lokalit). Výsledky této části prokazují validitu modelu navrženého v kapitole 4 a dále demonstrují přidanou hodnotu hyperspektrálních dat, jež jsou pořizována ve více časových horizontech. V poslední kapitole 6 je pomocí faktorové analýzy statisticky vyhodnocena široká škála biochemických parametrů za účelem vytipování jejich potenciálního využití jako nespécifických indikátorů vegetačního stresu. Tyto výsledky demonstrují, že vedle poměru  $\text{Car}/\text{Cab}$  je i obsah fenolických látek významným indikátorem vegetačního stresu.

## Úvod

Povrchová těžba uhlí je spojena s celou řadou environmentálních problémů, přičemž nejčastějším z nich je vznik kyselého prostředí (AMD: Acid Mine Drainage). Tento negativní jev je způsoben zvětráváním substrátů bohatých na síru, kdy dochází k chemickým reakcím a přeměnám za přístupu kyslíku a meteorické vody. Toto kyselé prostředí je hlavním faktorem způsobující mobilizaci těžkých kovů (Kabata-Pendias, 2004), jež se pak stávají mobilní, migrují v půdním i vodním prostředí a stávají se dostupnými pro kořenový systém vegetace. AMD charakterizuje výskyt sekundárních minerálů, jež jsou typické svojí prostorou i časovou sekvencí (Fe sulfátů, oxy-hydroxidů a oxidů, Montero et al., 2005; Swayze et al., 2000 and 2006). Tyto jednotlivé sekundární minerály jsou stabilní v určitém rozsahu pH, a jsou proto využívány jako pH indikátory.

Nízké pH a těžké kovy přítomné v mobilní formě jsou významným faktorem způsobující vegetační stres, na který rostliny reagují změnou celé řady biochemických parametrů listové (fotosyntetické pigmenty, fenolické látky, lignin). Právě tyto látky/parametry pak mohou být využity jako nespecifické indikátory vegetačního stresu. Zvláště pak změny v množství fotosyntetických pigmentů, jež jsou přímo spojeny s fotosyntetickými procesy, mohou sloužit jako indikátory detekující stres v jeho úplném počátku (e.g. Ivanov et al., 2011; Lepedus et al., 2005; Maestri et al., 2010).

Z tohoto pohledu povrchová těžba spojená s výše zmíněnými environmentálními problémy, představuje extrémně heterogenní a komplexní systém vyžadující multidisciplinární přístup. Moderní metody dálkového průzkumu Země přináší nové možnosti pro modelování celé řady chemických či fyzikálních parametrů (Gao et al., 2008; Heiskanen et al., 2008; Kokaly et al., 2003; Sirikulchayanon et al., 2008), přičemž obrazová data s vysokým spektrálním rozlišením (hyperspektrální data) umožňují kvantitativní druh analýzy (Clark et al., 1990; Ustin et al., 2009; Vane & Goetz, 1993; Van der Meer, 2004; Van der Meer et al. 2012).

Tento specifický druh distančních dat nabízí široký potenciál pro celou řadu environmentálních aplikací (Li et al., 2005, Kemper and Sommer, 2002, Hamzeh et al., 2013), avšak pouze omezený počet studií využívá metody obrazové spektroskopie pro analýzu plošně rozsáhlejších oblastí (regionů), či pro studium dynamiky prostředí s využitím časové řady. Toto lze přičíst poměrně vysokým finančním nákladům, které je nutno vynaložit na pořízení těchto dat, která jsou většinou pořizována letecky). Dalším faktorem jsou

pak vysoké nároky kladené na znalosti a zkušenosti experta, který tato data zpracovává a analyzuje. Proto i v současné době chybí obecně uchopitelné metody pro rychlé a spolehlivé získávání informací na podkladě hyperspektálních dat pokrývajících rozsáhlejší území/regiony, či analyzující dynamické změny v rámci definovaného časového období.

### ***Nadefinované cíle práce***

- (i) Vytvořit nové metodické přístupy vycházející z principů minerální a obrazové spektroskopie, které umožní přímo detekovat a plošně vymezit místa vznikající acidifikace (AMD) v prostředí zasaženém intenzivní povrchovou těžbou, dále pak i vytvořit kvantitativní model povrchového pH odkrytých povrchů.
- (ii) Vytvořit nové metodické přístupy využívající obrazovou spektroskopii pro detekci vegetačního stresu v jeho rané fázi, dříve než se projeví vizuální symptomy poškození. Model bude mít aplikační potenciál v regionálním měřítku.
- (iii) Verifikovat jednu z výše vytvořených metodik s využitím nové datové sady obrazových hyperspektrálních dat snímané v další časové období.
- (iv) Statisticky vyhodnotit rozdílné biochemických parametry za účelem vytipování jejich potenciálního využití v oblasti obrazové spektroskopie jako nespécifických indikátorů vegetačního stresu.

Disertační práce je souhrnnou formou 5 publikací (*viz. Publikace*) a je členěna do dvou tematických celků. První z nich (kapitoly 2 a 3) je věnován aplikaci minerální a obrazové spektroskopie pro vymezení plošného výskytu AMD a modelování povrchového pH. Druhá tematická část (kapitoly 4, 5 a 6) se věnuje zhodnocení fyziologického stavu smrkových porostů.

### **Metody**

V kapitole 2 jsou využita satelitních dat ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer satellite data) a pomocí metody LSU (Linear Spectral Unmixing; algoritmus zohledňující vícesložkový/směsný obsah pixelu v lineárním poměru) plošně vymezeny kyselé zvětralinové povrchy ( $\text{pH} < 4$ ), jež charakterizuje výskyt jarositu a lignitu (hnědé uhlí).

V kapitole 3 je nejdříve nadefinován konceptuální model řešící vztah mezi pH a výskytem tzv. indikativních minerálů, které jsou stabilní v určitém rozsahu pH. U těchto indikativních minerálů jsou analyzovány jejich optické vlastnosti a nalezeny takové parametry absorpčních příznaků, jež jsou společné jak pro „čisté“ minerály, tak i pro jejich směsi. Je zjištěno, že posun absorpčního maxima v rozmezí 0.9-1.0  $\mu\text{m}$  směrem do delších vlnových délek umožňuje vzájemně rozlišit zkoumané sekundární  $\text{Fe}^{3+}$  minerály (jarosit a goethit). Tohoto trendu je dále využito i pro jejich prostorové mapování a relativní kvantifikaci. S využitím metody „Multi Range Spectral Feature Fitting“ (MRSFF), jež pomocí výpočtu nejmenších čtverců určuje míru podobnosti sledovaných absorpčních příznaků mezi typologickým spektrem (anglický termín: end-member) a obrazovým spektrem (v tomto případě HyMap 07/2009), byly identifikovány nadefinované indikativní minerály, které se v prostředí hnědouhelné pánve vyskytují převážně ve formě minerálních směsí. Dále byl pomocí vícenásobné regrese sestrojen validní model pro kvantitativní odhad povrchového pH.

Za účelem zhodnocení zdravotního stavu těchto porostů je sestrojena kvantitativní mapa obsahu celkového chlorofylu (Cab), jež je konstruována na základě vegetačního indexu odvozeného z derivovaného spektra ( $D_{718}/D_{708}$ ) obrazových dat HyMap (07/2009). Dále jsou z obrazových dat derivovány a analyzovány další indexy indikující vegetační stres (REP: Red Edge Position, SIPI: Structure Insensitive Pigment Index, PRI: Photosynthetic Reflectance Index). Výsledně je vytvořen statistický model integrující obsah chlorofylu (Cab) s vegetačními indexy REP a SIPI, jež umožňuje vyhodnotit fyziologický stav smrkových porostů a identifikovat případný stress i u takových porostů, jež ještě nevykazují viditelné symptomy poškození (kapitola 4).

V kapitole 5 je výše popsaná metoda aplikována na další sadu hyperspektrálních dat HyMap, jež byly pořízeny v následujícím roce (08/2010). Výsledky klasifikace jsou dále validovány s biochemickými parametry smrkového jehličí a asociovány s geochemickými podmínkami půdního prostředí.

V poslední kapitole 6 je statisticky vyhodnocena široká škála biochemických parametrů za účelem vytipování jejich potenciálního využití jako nesespecifických indikátorů vegetačního stresu. Faktorová analýza je aplikována pro statistické testování vztahu mezi biochemickými parametry jehličí a vertikální distribucí půdních makro-nutričních parametrů a potenciálně toxických prvků.

## Výsledky a diskuze

V této části jsou konfrontovány dosažené výsledky s nedefinovanými cíli této disertační práce.

***Vytvořit nové metodické přístupy vycházející z principů minerální a obrazové spektroskopie, které umožní přímo detekovat a plošně vymezit místa vznikající acidifikace (AMD) v prostředí zasaženém intenzivní povrchovou těžbou, dále pak i vytvořit kvantitativní model povrchového pH odkrytých povrchů.***

Vzhledem k prostorovému rozlišení použitých satelitních dat ASTER (VNIR: 15 m, SWIR=30 m), které byly využity pro vymezení plošného výskytu povrchové acidifikace, bylo klíčové identifikovat tzv. „čisté“ pixely, jejichž spektrální charakteristiky se staly vstupem do modelu zohledňující vícerozložkový/směsný obsah pixelu (LSU: Linear Spectral Unmixing). Výsledkem je validovaná mapa plošně vymezující kyselé zvětralinové povrchy (pH<4) (Kopačková et al. 2012). Tento druh aplikace ukazuje, že i satelitní data, která jsou v porovnání s leteckými hyperspektrálními daty velmi levná a rychle dostupná, mohou přinést dobré výsledky pro detekci kyselých povrchů (*kapitola 2*).

V *kapitole 3* je řešen problém vytvoření modelu umožňující kvantitativní odhad povrchového pH a to v prostředí charakteristické extrémní heterogenitou. Zde bylo klíčové prvotně vytvořit konceptuální model řešící vztah mezi pH a výskytem tzv. indikativních minerálů, které jsou stabilní v určitém rozsahu pH a mohou být proto využity jako jeho indikátory. Pro modelování byla využita letecká hyperspektrální data HyMap (07/2009) s vysokým prostorovým rozlišením (5 m), avšak i v tomto případě bylo potřeba zohlednit směsný charakter pixelu a nalézt postup, umožňující identifikaci tzv. indikativních minerálů, jež se vyskytují převážně ve formě směsí. Tuto podmínku splnila metoda Multiple Spectral feature Fitting (MRSFF), která umožnila využít spektrální knihovny topologických minerálů (převážně bodová měření s nízkou úrovní heterogenity měřeného materiálu) pro přímo identifikaci v hyperspektrálním obraze (plošný charakter, míra heterogenity přímo narůstá s prostorovou velikostí pixelu) a tím splnila podmínku pro jednodušší a univerzálnější aplikovatelnosti. Výsledný kvantitativní model ( $R^2$ : 0.61,  $R_v^2$ : 0.76) byl konstruován vícenásobnou regresí (Kopačková, submitted). Tato studie je jednou z prvních, jež aplikuje metody obrazové spektroskopie pro kvantitativní

modelování pH v prostředí povrchových dolů vyznačující se vysokou heterogenitou.

***Vytvořit nové metodické přístupy využívající obrazovou spektroskopii pro detekci vegetačního stresu v jeho rané fázi, dříve než se projeví vizuální symptomy poškození. Model bude mít aplikační potenciál v regionálním měřítku.***

Na podkladě leteckých dat HyMap (07/2009) je sestrojena kvantitativní mapa obsahu celkového chlorofylu (Cab), jež vykazovala relativně vysokou přesnost (RMSE: 0.21 mg/g,  $R^2=0.91$ ,  $R_v^2: 0.94$ ). Dále je vytvořen nový statistický model integrující vedle vlastního obsahu chlorofylu (Cab) další vegetační indexy REP a SIPI korelující s fyziologickým vegetace (kapitola 4). Tento model má jedinou podmínkou při své aplikovatelnosti, vstupní data musí vykazovat normální rozdělení (model definuje hraniční hodnoty oddělující jednotlivé třídy na podkladě tzv. normalizovaných z-skórů). Výsledkem je mapa sokolovské pánve klasifikující zdraví smrkových porostů v rámci pěti zdravotních tříd (třída 1 nejlepší zdravotní stav, třída 5 nejhorší zdravotní stav) (Mišurec, Kopačková et al., 2012). Smrkové porosty byly vybrány vzhledem k faktu, že tvoří dominující druh rostoucí v této oblasti vhodný pro studium vegetačního stresu.

***Verifikovat jednu z výše vytvořených metodik s využitím nové datové sady obrazových hyperspektrálních dat snímané v další časové období.***

Na výše zmíněnou studii navazuje následující kapitola (kapitola 5), jež se věnuje další validaci této metody. Výše popsaná metoda byla aplikována na další sadu hyperspektrálních dat HyMap, jež byly pořízeny v následujícím roce (08/2010). Výsledky klasifikací obou hyperspektrálních datových sad (HyMap 07/2009 a 08/2010), jsou ve shodě se statistickým vyhodnocením biochemických a geochemických parametrů, a shodně identifikují zatížené lokality (Kopačková et al., submitted). Výsledky potvrzují, že se jedná o validní metodu, která má další potenciál pro monitoring zdraví lesních porostů.

***Statisticky vyhodnotit rozdílné biochemických parametry za účelem vytipování jejich potenciálního využití v oblasti obrazové spektroskopie jako nespecifických indikátorů vegetačního stresu.***

V poslední kapitole je statisticky vyhodnocena široká škála biochemických parametrů za účelem vytipování jejich potenciálního využití jako

nespecifických indikátorů vegetačního stresu. Je nalezen vztah mezi koncentracemi arzenu (As) a hliníku (Al) v jehličí a v půdním profilu. Kromě toho byl nalezen také vztah mezi koncentracemi As a Al, obsahem fenolických látek v jehličích a poměrem fotosyntetických pigmentů Car/Cab (karotenoidy/chlorofyl: Car/Cab). Tyto výsledky demonstrují, že vedle poměru Car/Cab je i obsah fenolických látek významným indikátorem vegetačního stresu (Kopačková et al., under review). Oba tyto parametry je proto vhodné využít pro detekci vegetačního stresu. Vývoj nových modelů/postupů pro jejich přesnější stanovení pomocí obrazové spektroskopie tak přinese nové možnosti pro monitoring fyziologického stavu lesních porostů.

## Závěr

Předložená práce demonstruje možnosti přímé aplikovatelnosti metod obrazové spektroskopie do oblasti monitoringu životního prostředí. Dosažené výsledky jsou shrnuty v rámci následujících závěrů a doporučení:

- Úspěšná atmosférická korekce je elementární podmínkou předcházející úspěšnou analýzu obrazových hyperspektrálních dat. Tato podmínka je ještě zesílena v případě, že je analyzován větší počet letových linií či v případě, že jsou využita HS data pořizovaná v rámci vícero časových úrovní. V těchto případech je vysoce pravděpodobné, že data budou vedle atmosférické korekce vyžadovat i korekci na tzv. BRDF efekt (Bi-directional Reflectance Distribution Function). Tato práce se přímo nezabývá touto problematikou, avšak použitá letecká HS data byla korigována vůči vlivu atmosféry i BRDF.
- Prostředí povrchové těžby představují komplexní systém, jenž se navíc vyznačuje extrémní úrovní heterogenity. Proto modely zabývající se problematikou kyselého prostředí ve vztahu k mineralogii musí reflektovat specifika studované lokality a je potřeba v první úrovni vytvořit konceptuální model poplatný místním podmínkám.
- V tomto heterogenním prostředí i data s vysokým prostorovým rozlišením (HyMap: 5m) vykazují problém vícenosložkového mísení v rámci pixelu. Tudíž nejlepších výsledků lze dosáhnout s využitím takových metod, jež berou v potaz vícenosložkový charakter pixelu popř. metod, které umožňují univerzálně použít bodová spektrální měření (charakteristická žádnou či nízkou úrovní heterogenity měřeného materiálu) pro analýzu obrazových HS dat (plošný



charakter, míra heterogenity přímo narůstá s prostorovou velikostí pixelu).

- Bylo zjištěno, že posun absorpčního maxima v rozmezí 0.9-1.0  $\mu\text{m}$  směrem do delších vlnových délek umožňuje vzájemně rozlišit zkoumané sekundární  $\text{Fe}^{3+}$  minerály (jarosit a goethit) a navzájem je rozlišit i v případě minerálních směsí. Tohoto trendu je dále využito a i pro jejich prostorové mapování a relativní kvantifikaci. Alternativně lze testovat jiné techniky, kterými lze modelovat pozici absorpčního maxima/vlnovou délku (derivační analýza, kvadratická funkce), výsledky by bylo v tomto případě vhodné srovnat.
- Metoda „Multi Range Spectral Feature Fitting“ (MRSFF) byla shledána dostatečně citlivou metodou schopnou detekovat i jemné rozdíly mezi sledovanými parametry (viz. pozice absorpčního maxima) typologických absorpčních příznaků, navíc tato metoda prokázala svoji dostatečnou univerzálnost.
- Vegetační stres lze detekovat pomocí metod obrazové spektroskopie na lesních porostech, u kterých se ještě tento negativní jev neprojevuje vizuálně. Metoda navržená v rámci této práce byla verifikována s biochemickými parametry smrkového jehličí a geochemickými podmínkami půdního prostředí. Výsledky potvrzují, že se jedná o validní metodu, která má další potenciál pro monitoring zdravých lesních porostů obzvláště v případě, že je použita HS obrazová data pořizována v rámci vícero časových období.
- Pouze velmi omezený počet studií se věnuje využití obrazové spektroskopie pro modelování obsahu fenolických látek v listovní. Vývoj nových modelů/postupů pro jejich přesnější stanovení pomocí obrazové spektroskopie tak přinese nové možnosti pro monitoring fyziologického stavu lesních porostů.

## Abstract

The main purpose of this thesis is to use Image Spectroscopy as a tool to monitor the environmental conditions in a region affected by anthropogenic activities via estimating both geochemical and biochemical parameters on a regional scale. The research has been carried on the Sokolov lignite mine, NW Bohemia, a region affected by long-term extensive mining. The thesis is divided into two thematic parts. First part is devoted to applications of Image Spectroscopy into Acid Mine Drainage mapping and its related issues (chapters 2 and 3).

In *chapter 2* the equivalent mineral end-members were successfully derived from the ASTER image data (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer satellite data). In *the chapter 3* the pH was estimated on the basis of mineral and image spectroscopy. The Multi Range Spectral Feature Fitting (MRSFF) technique was utilized for mineral mapping and the multiple regression model using the fit images, the results of MRSFF, as inputs was constructed to estimate the surface pH and statistical significant accuracy was attained.

In the second thematic part (*chapters 4-6*) Image Spectroscopy is applied into monitoring of vegetation stress. A new statistical method was developed to assess the physiological status of macroscopically undamaged foliage of Norway spruce (*chapter 4*). As the chlorophyll content alone may not correspond sufficiently well to the physiological/health status, the suggested method utilized three indicators (Cab, REP, expSIPI). In the following study (*chapter 5*) the same method is employed and validated while using additional temporal HS image data set (08/2010). Both biochemical analysis of the sampled foliage and classification of 2009 and 2010 hyperspectral images identified the same sites affected by vegetation stress.

Lastly, the potential of diverse foliar biochemical parameters used as stress indicators is assessed to suggest the most sensitive once having the biggest potential for future HS Remote Sensing forest monitoring. The correlations between two toxic element contents in needles (aluminum (Al) and arsenic (As)) and the contents of soluble phenolic compounds and total carotenoid to chlorophyll (Car/Cab) ratio suggest that these latter two biochemical parameters can serve as suitable non-specific stress markers, thus should be further considered for vegetation stress monitoring while employing the methods of Image Spectroscopy (*chapter 6*).

## Introduction

Although the principles of spectroscopy are well known and methods for analysis have been widely developed, particularly for spectra collected in laboratory environments, the heterogeneity of landscapes and earth surface features in extensive environmental studies still presents new challenges and opportunities for analysis of hyperspectral (HS) imagery. Image spectroscopy is potentially the best approach for assessing diverse environmental issues, however very little research has been performed on a regional scale and on long-term monitoring, mainly because of the rather high costs related to HS data acquisition and the expert knowledge which is still required for HS data pre-processing and processing. The main purpose of this thesis is to use Image Spectroscopy as a tool to monitor the environmental conditions in a region affected by anthropogenic activities via estimating both geochemical and biochemical parameters on a regional scale. The research has been carried on the Sokolov lignite mine, NW Bohemia, a region affected by long-term extensive mining.

Coal mining generates a number of significant environmental impacts, such as increased acidity of the soil/water environment, called mineral Acid Mine Drainage (AMD). AMD is produced when sulfide-bearing material is exposed to oxygen and water. Characterized by low pH and high concentrations of heavy metals and other toxic elements (Kabata-Pendias, 2004), AMD can severely contaminate surface waters and groundwater, as well as soils, and stresses the surrounding vegetation. The typical AMD pattern leads to accumulation of Fe sulfates, oxy-hydroxides, and oxides in a spatial and temporal sequence that represents the buffering of an acidic solution as it moves away from its source (Montero et al., 2005; Swayze et al., 2000 and 2006). AMD can then be mapped by identifying these typical spatial sequences of indicative minerals.

Low substrate pH and heavy metal contamination are stress factors for vegetation and lead to changes in the contents of important leaf/foilage compounds (e.g., photosynthetic pigments, phenolic compounds and lignin), which can be used as non-specific indicators of plant stress. Particularly the contents of photosynthetic pigments are closely related to photosynthetic performance and can serve as early-warning symptoms of plant stress, before macroscopic changes are detected (e.g. Ivanov et al., 2011; Lepedus et al., 2005; Maestri et al., 2010).

From this point of view, a mining environment with high acidity, high heavy metal concentrations and extreme heterogeneity represents a complex system that needs to be assessed in a multidisciplinary way.

Estimates of physical and chemical parameters over large areas can be obtained using remote sensing data acquired from an air or space platform (Gao et al., 2008; Heiskanen et al., 2008; Kokaly et al., 2003; Sirikulchayanon et al., 2008). Modern remote sensing has become a novel tool not only for detecting target materials but also for monitoring dynamic processes and induced changes in physical/chemical properties. Imagery with higher spectral resolution (e.g., hyperspectral) provides sufficient spectral resolution to describe diagnostic absorption signatures (Clark et al., 1990; Ustin et al., 2009; Vane & Goetz, 1993; Van der Meer, 2004; Van der Meer et al. 2012). Data with very high spectral resolution – hereafter referred to as imaging spectroscopy (IS) data, which is also known in the remote sensing community as hyperspectral (HS) data, has been successfully used in earlier studies to detect environmental factors, such as oil contamination (Li et al., 2005), hazardous mining materials (Kemper and Sommer, 2002) or vegetation stress and damage (Hamzeh et al., 2013).

From this point of view, Image spectroscopy (HS remote sensing) is potentially the best approach for assessing diverse environmental issues; however very little research has been performed on a regional scale and on long-term monitoring, mainly because of the rather high costs related to HS data acquisition and the expert knowledge which is still required for HS data pre-processing and processing. Therefore, even today there is still a lack of multi-stripe and/or time-series HS data and reliable methods for extracting the required information for these datasets.

Based on the concept described above the **objectives were formulated:**

- (i) To formulate mineral spectroscopy-based techniques allowing identification of acidity sources and surface pH estimation for exposed surfaces in extremely heterogeneous environments characteristic for mining sites.
- (ii) To formulate a HS remote sensing technique allowing early detection of vegetation stress on a regional scale.
- (iii) To validate one of the latter techniques using an additional temporal HS image dataset.
- (iv) To assess the applicability of using diverse needle biochemical parameters as biological indicators of adverse

soil condition parameters and select the most sensitive ones with the greatest potential for future HS Remote Sensing

## Material and methods

Initially, high-altitude spectroradiometry (ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer satellite data) together with ground-based spectroradiometry are employed in order to identify the locations of the most significant sources of Acid Mine Drainage (AMD) discharge at the Sokolov lignite open-pit mines (*chapter 2*). The LSU (Linear Spectral Analysis) was a sufficient first order approximation to constrain the mineralogy as the absolute abundances of the indicative minerals were not required. The map with the low pH zones delineated achieved sufficient overall accuracy (75%).

Next (*chapter 3*), a geochemical conceptual model of the site is defined. The multi Range Spectral Feature Fitting (MRSFF) technique is employed to map the defined mineral end-members indicating certain pH ranges in the HS image datasets (HyMap data acquired 07/2009). Furthermore, the multiple regression model using the fit images, the results of MRSFF, as inputs was constructed to estimate the surface pH and statistical significant accuracy was attained ( $R^2=0.61$ ,  $R_v^2=0.76$ ).

In the second thematic part (*chapters 4-6*) Image Spectroscopy is applied into monitoring of vegetation stress. The model based on the derivative indices ( $D_{718}/D_{708}$ ) attaining the greatest accuracy (RMSE: 0.21 mg/g,  $R_v^2$ : 0.94) is selected to produce a map of foliar chlorophyll concentrations (Cab). As a result, the following HyMap derived parameters (Cab, REP: Red Edge Position, SIPI: Structure Insensitive Pigment Index, PRI: Photosynthetic Reflectance Index) are integrated together to assess the subtle changes in physiological status of the macroscopically undamaged foliage of Norway spruce (*chapter 4*).

In the following study (*chapter 5*) the same method described above is employed and validated while using additional temporal HS image data set (HyMap 2010 data) in order to (i) validate the new method (*chapter 4*), The method prove suitable as the HyMap classification results were in accordance with the statistical assessment of the biochemical properties of the sampled trees as well as with the geochemical properties of the forest sites.

Lastly (*chapter 6*), the potential of diverse foliar biochemical parameters used as stress indicators is assessed to suggest the most sensitive one having the biggest potential for future HS Remote Sensing forest monitoring. Factor analysis is used to identify underlying variables that explain the pattern of correlations within and between the biochemical and geochemical datasets.

## **Results and discussion**

Major research findings relevant to the specific research objectives are described below:

***To formulate mineral spectroscopy-based techniques allowing identification of acidity sources and surface pH estimation for exposed surfaces in extremely heterogeneous environments characteristic for mining sites.***

In chapter 2, high-altitude spectroradiometry (ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer satellite data) together with ground-based spectroradiometry were employed in order to identify the locations of the most significant sources of Acid Mine Drainage (AMD) discharge at the Sokolov lignite open-pit mines (Kopačková et al., 2012). The equivalent mineral end-members were successfully derived from the ASTER image data (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer satellite data) and a sub-pixel method (Linear Spectral Unmixing, LSU) was employed to relatively estimate the selected end-member abundances and to identify low-pH zones. The sub-pixel method (LSU) was selected due to the extreme heterogeneity of the Sokolov surfaces and diverse material mixing level present in the ASTER pixels (VNIR: 15 m, SWIR: 30 m). The LSU analysis was a sufficient first order approximation to constrain the mineralogy as the absolute abundances of the indicative minerals were not required. The map with the low pH zones delineated achieved sufficient overall accuracy (75%).

In the following study (chapter 3) pH was estimated on the basis of mineral and image spectroscopy (Kopačková, submitted). First, a geochemical conceptual model of the site was defined. Diagnostic minerals of very low pH (<3.0) as well as increased pH (3.0-6.5) and nearly neutral or higher pH (>6.5) were identified. In heterogeneous environment characterizing mining sites, the pixel reflectance (in this case HyMap pixel size was 5x5 m) has a significant mixing problem. Therefore, it was necessary to identify such

absorption feature parameters which are common for individual minerals as well as mineral mixtures and select a mapping technique/method which is robust enough to identify the targeting minerals even if present as part of mixtures. The Multi Range Spectral Feature Fitting (MRSFF) technique was found to be sensitive enough to assess differences in the desired spectral parameters (e.g., absorption maximum wavelength position, absorption depth) and to be scalable in the way that field spectra end-members were successfully used for the HS image mapping. This study represents one of the very first approaches employing image spectroscopy for quantitative pH modeling in a mining environment and the achieved results demonstrate the potential application of hyperspectral remote sensing as an efficient method for environmental monitoring.

***To formulate a HS remote sensing technique allowing early detection of vegetation stress on a regional scale.***

A new statistical method was developed to assess the physiological status of macroscopically undamaged foliage of Norway spruce (*chapter 4*) (Mišurec, Kopačková et al., 2012). As the chlorophyll content alone may not correspond sufficiently well to the physiological/health status, the suggested method utilized three indicators (Cab, REP, expSIPI). Two products were created using HyMap 2009 multi-flight line data: the map of chlorophyll content (Cab) and a raster combining the information from REP (sensitive to vegetation stress) and expSIPI (sensitivity to the ratio of bulk carotenoids to chlorophyll). For both products a relative classification (normalized z-scores) was used based on the histogram dynamic ranges, averages and standard deviations. Consequently, no hard threshold values were required. The only condition to be fulfilled was a normal distribution of the classified data. In both maps, Class 1 indicates worse health status for the trees without visible damage symptoms and Class 5 corresponds to the values indicating the healthiest trees. As this method takes in account the two major biochemical parameters that are closely connected with photosynthetic functions, it allows assessing of the vegetation stress in a more objective way. However it is necessary to emphasize that this method is suitable for one-species (monoculture) forests. Norway spruce was selected as it represents the predominant forest species in the studied region; in addition, spruce needles were confirmed to be well-suited for detection of contamination.

***To validate one of the latter techniques using an additional temporal HS image dataset.***

In the following study (*chapter 5*) the same method described above was employed and validated while using additional temporal HS image data set (HyMap 2010 data) in order to (i) validate the new method (*chapter 4*), (ii) study the forest Norway Spruce variations in biochemical parameters while comparing the foliar pigment content from the samples collected in two subsequent growing seasons, (iii) assess vegetation stress within the selected Norway spruce sites while putting together information on forest stand geochemical conditions, foliar biochemistry (pigment contents) and the temporal differences detected by classifying the two HS image datasets acquired one year apart. To summarize the results, both biochemical analysis of the sampled tree needles and hyperspectral image data have been shown to reflect the soil chemistry. Higher Car/Cab ratios in spruce needles and lower health status derived from HyMaps were related to the lowest Bc/Al ratio in mineral soil. The strong linkage between soil chemistry and parent bedrock indicated that bedrock geochemical reactivity should be considered to be important factor in the assessment of forest health status (Kopačková et. al., submitted).

The method proved suitable as the HyMap classification results were in accordance with the statistical assessment of the biochemical properties of the sampled trees as well as with the geochemical properties of the forest sites. Apparently, in both years, differences detected by biochemical and hyperspectral methods remained consistent among spruce stands and only mild changes in the physiological condition of the stands under study were detected by both approaches. This finding supports the validity of the previously presented model.

***To assess the applicability of using diverse needle biochemical parameters as biological indicators of adverse soil condition parameters and select the most sensitive ones with the greatest potential for future HS Remote Sensing monitoring.***

*In chapter 6* the relationship between soil and spruce needle contents of macronutrients and potentially toxic elements was studied and tested whether the soil parameters and their vertical distribution within a soil profile (two organic and two mineral horizons) affect foliage biochemical parameters (contents of photosynthetic pigments, phenolic compounds and lignin) (Kopačková et al., under review). Factor analysis identified Al and As as toxic elements with high bio-availability for spruce trees, whereas acid soil conditions facilitate the heavy metal uptake by the roots. For these toxic elements detected as mobile in the studied soils, a correlation



between concentrations in the Norway spruce tissues and the two biochemical parameters – soluble phenolic compounds and Car/Cab ratios was found. This finding suggests that these latter two biochemical parameters, which both proved to be sensitive to the soil geochemical conditions, can serve as suitable non-specific stress markers. The results demonstrated in *chapters 4 and 5* also point out that Car/Cab is more suitable indicator of forest health than using just absolute contents of both photosynthetic pigments.

## Conclusions

The presented studies demonstrate the potential application of hyperspectral remote sensing as an efficient method for environmental monitoring. The presented research resulted in the following overall conclusions:

- Good performance of hyperspectral image analysis depends on accurate atmospheric correction, which has a strong influence on the spectral diagnoses. If multi-flight line and multi-date hyperspectral data are used, additional corrections for the BRDF effect may need to be implemented; especially if sensors with wide field of view are utilized. To minimize the BRDF effect flight lines should follow the N-S directions. Although this thesis doesn't address this issue, the HS image data were corrected for the atmospheric and BRDF effects.
- The mining environment is characteristic for its high heterogeneity and complexity. Therefore, Acid Mine Drainage (AMD) mapping should be tailored to the specifics of the tested mining site and a simplified concept needs to be set out first. A conceptual model depicting the minerals that reflect the specific site conditions and indicate a certain pH needs to be defined prior spectral mapping.
- Even high-spatial-resolution (5-m pixel) images have contributions from multiple sub-pixel-scale components. Based on these findings, the most efficient and valid methods are those taking in account the spectral mixture models or methods which are scalable as a pixel is represented by an area on the ground whereas a sample is a point on the ground.
- The shift to longer wavelengths of the absorption maximum centered between 0.90-1.00  $\mu\text{m}$  was found to be the main parameter that allows differentiation among the  $\text{Fe}^{3+}$  secondary

minerals even if they are present as mixtures. Alternatively, other techniques which allow absorption feature wavelength estimation (e.g., derivative analysis, quadratic method) should be tested and results compared.

- The Multi Range Spectral Feature Fitting (MRSFF) technique was employed for mineral mapping and was found to be sensitive enough to assess differences in the desired spectral parameters (e.g., absorption maximum wavelength position, absorption depth). Additionally, this technique was found to be scalable as the field spectra of fundamental mineral end-members were successfully utilized for mineral mapping within the HS image data.
- Physiological status of macroscopically undamaged foliage can be assessed by the means of image spectroscopy and stress can be detected prior the symptoms are visually expressed. The suggested method to classify health status of the Norway spruce forests proved suitable as the HyMap classification results were in accordance with the statistical assessment of the biochemical properties of the sampled trees as well as with the geochemical properties of the forest sites. If Multi-date HS data are utilized, this method has further potential for monitoring of forest ecosystems.
- Too few studies have been devoted to estimation of phenolics for forest canopy but the published results show that these compounds are detectable by means of optical remote sensing as they were successfully predicted using PLSR. Therefore further research should be done in this field to investigate how phenolics could be estimated and further used for detecting forest stress using imaging spectroscopy.

## Literatura/References

Clark, R. N.; King, T. V. V.; Klejwa, M.; Swayze, G. A. & Vergo, N. (1990), 'High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals', *Journal of Geophysical Research-solid Earth and Planets* **95**(B8), 12653-12680.

Gao, J. & Liu, Y. S. (2008), 'Mapping of land degradation from space: a comparative study of Landsat ETM+ and ASTER data', *International Journal of Remote Sensing* **29**(14), 4029-4043.

Hamzeh, S.; Naseri, A. A.; AlaviPanah, S. K.; Mojaradi, B.; Bartholomeus, H. M.; Clevers, J. G. P. W. & Behzad, M. (2013), 'Estimating salinity stress in sugarcane fields with spaceborne hyperspectral vegetation indices', *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **21**, 282-290.

Heiskanen, J. (2008), 'Evaluation of global land cover data sets over the tundra-taiga transition zone in northernmost Finland', *International Journal of Remote Sensing* **29**(13), 3727-3751.

Ivanov, Y. V.; Savochkin, Y. V. & Kuznetsov, V. V. (2011), 'Scots pine as a model plant for studying the mechanisms of conifers adaptation to heavy metal action: 1. Effects of continuous zinc presence on morphometric and physiological characteristics of developing pine seedlings', *Russian Journal of Plant Physiology* **58**(5), 871-878.

Kabata-Pendias, A. (2004), 'Soil-plant transfer of trace elements - an environmental issue', *Geoderma* **122**(2-4), 143-149.

Kemper, T. & Sommer, S. (2002), 'Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy', *Environmental Science & Technology* **36**(12), 2742-2747.

Kokaly, R. F.; Despain, D. G.; Clark, R. N. & Livo, K. E. (2003), 'Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data', *Remote Sensing of Environment* **84**(3), 437-456.

Kopačková, V. (submitted), 'Using multiple spectral feature analysis for quantitative pH mapping in a mining environment', *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*..

Kopačková, V., Mišurec, J., Lhotáková, Z., Oulehle, F., Albrechtová, J., (submitted), 'Using multi-date high spectral resolution data to assess the physiological status of macroscopically undamaged foliage on a regional scale', *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.

Kopačková, V., Lhotáková, Z., Oulele, F., Albrechtová, J. (under review), 'Assessing forest health via linking the geochemical properties of a soil profile with the biochemical vegetation parameters', *International Journal of Environmental Science and Technology*.

Kopačkova, V.; Chevrel, S.; Bourguignon, A. & Rojik, P. (2012), 'Application of high altitude and ground-based spectroradiometry to mapping hazardous low-pH material derived from the Sokolov open-pit mine', *Journal of Maps* **8**(3), 220-230.

Lepedus, H.; Viljevac, M.; Cesar, V. & Ljubescic, N. (2005), 'Functioning of the photosynthetic apparatus under low and high light conditions in chlorotic spruce needles as evaluated by in vivo chlorophyll fluorescence', *Russian Journal of Plant Physiology* **52**(2), 165-170.

Li, L.; Ustin, S. L. & Lay, M. (2005), 'Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico', *Remote Sensing of Environment* **94**(1), 1-16.

Maestri, E.; Marmioli, M.; Visioli, G. & Marmioli, N. (2010), 'Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment', *Environmental and Experimental Botany* **68**(1), 1-13.

Misurec, J.; Kopačkova, V.; Lhotakova, Z.; Hanus, J.; Weyermann, J.; Entcheva-Campbell, P. & Albrechtova, J. (2012), 'Utilization of hyperspectral image optical indices to assess the Norway spruce forest health status', *Journal of Applied Remote Sensing* **6**, 063545.

Montero, I. C.; Brimhall, G. H.; Alpers, C. N. & Swayze, G. A. (2005), 'Characterization of waste rock associated with acid drainage at the Penn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping', *Chemical Geology* **215**(1-4), 453-472.

Sirikulchayanon, P.; Sun, W. X. & Oyana, T. J. (2008), 'Assessing the impact

of the 2004 tsunami on mangroves using remote sensing and GIS techniques', *International Journal of Remote Sensing* **29**(12), 3553-3576.

Swayze, G. A.; Livo, K. E.; Clark, R. N.; Hoefen, T. M.; Higgins, C. T.; Ong, C.; Kokaly, R. F. & Kruse, F. A. (2006), 'Evaluating Minerals of Environmental Concern Using Spectroscopy', *2006 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vols 1-8*, 1990-1991.

Swayze, G. A.; Smith, K. S.; Clark, R. N.; Sutley, S. J.; Pearson, R. M.; Vance, J. S.; Hageman, P. L.; Briggs, P. H.; Meier, A. L.; Singleton, M. J. & Roth, S. (2000), 'Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste', *Environmental Science & Technology* **34**(1), 47-54.

Ustin, S. L.; Gitelson, A. A.; Jacquemoud, S.; Schaepman, M.; Asner, G. P.; Gamon, J. A. & Zarco-Tejada, P. (2009), 'Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy', *Remote Sensing of Environment* **113**, S67-S77.

Van der Meer, F. (2004), 'Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery', *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **5**, 55-68.

Van der Meer, F. D.; Van der Werff, H. M. A.; Van Ruitenbeek, F. J. A.; Hecker, C. A.; Bakker, W. H.; Noomen, M. F.; van der Meijde, M.; Carranza, E. J. M.; de Smeth, J. B. & Woldai, T. (2012), 'Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review', *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **14**(1), 112-128.

VANE, G. & GOETZ, A. F. H. (1993), 'Terrestrial Imaging Spectrometry - Current Status, Future-trends', *Remote Sensing of Environment* **44**(2-3), 117-126.

## **Curriculum vitae/Selected publications**

**Veronika Kopačková**

### **Education**

1999-2001: MSc., Master's degree in Environmental Studies, Faculty of Science, Charles University

1998-2000: MSc. program in geochemistry, Faculty of Science, Charles University

1996-1998: Bc., Bachelor's degree in geology, Faculty of Science, Charles University

### **Professional training courses**

2005: Pecomines II training course, JRC Ispra - "Use of remote sensing for mapping and evaluating of mining waste anomalies" – training at JRC, Ispra

2008: Certificate for successful training participation Course Atmospheric Correction over Land using ATCOR. (4-day training), DLR, Germany

2008: 2nd HYPER-I-NET Summer School: Earth Science and Applications using Imaging Spectroscopy, Wageningen University, Holland.

2009: 3rd HYPER-I-NET Summer School "Hyperspectral data: from images to information" Pavia, Italy.

2010: Distance course in Hyperspectral Remote Sensing. ITC/Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente. 144 hours equivalent to 5 ECTS. Grade: Excellent.

2011: Distance course in Learning IDL for Building Expert and Earth Observation (2011). ITC/Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente. 144 hours equivalent to 5 ECTS. Certificate (95%).

2011: Summer School on Practical Methods for Modeling Soil Spectral Information (DePeMossi): Under N4EWG – Expert Working Group: Soil spectroscopy activity and leadership ISPRS WGV11/3 Information Extracted from Hyperspectral Data GFZ, Potsdam August 29-31/2011.

## **Employment record**

2001-2003: GIS specialist, Dept. of Informatics, Czech Environmental Institute, Prague

Since 2003: Remote Sensing and GIS specialist, Informatics, Czech Geological Survey

Since 2006: Coordinator of the Remote Sensing Unit (Czech Geological Survey)

Since 2009: External lecturer at the Charles University in Prague (Faculty of Science)

### Research interests

Remote Sensing and GIS applications into geosciences: Image Spectroscopy, Optical and Thermal remote sensing, Slope instability modeling, Integration of RS techniques into diverse environmental studies

### **Scientific Projects - Primary Investigator**

2007-2009: Observation des effets d'exploitation à ciel ouvert fondé sur la spectroscopie optique et thermique, bilateral cooperation ČGS-BRGM.

2009-2012: Assessment of Mining Related Impacts Based on Utilization of ARES Airborne Hyperspectral Sensor. GAČR No. 205/09/1989, Czech Science Foundation.

2010-2012: Czech Coordinator for the FP7 project: EO-MINERS-Earth Observation for Monitoring and Observing Environmental and Societal Impacts of Mineral Resources Exploration and Exploitation.

2011-2014: Czech Coordinator for the FP7 project: PANGEO: Enabling access to geological information in support of GMES.

2011: DeMinTIR: Detection of Mineral Surface Parameter and Vegetation status from Airborne Thermal Infrared Imagery (EUFAR)

2013-2014: HyperAlgo: Development of algorithms and computing techniques for data mining of spectral-based information for ecological and soil mapping, Czech Ministry of Education, Czech-Israel cooperation.

### **Scientific Projects - Co-investigator**

2009 - 2011: Recent deglaciation of the northern part of James Ross Island, Antarctica. GAČR No. 205/09/1876

2004-2009: Geological studies of natural hazards, El Salvador (Foreign development aid of the Czech Rep.

2004-2010: Natural hazards in the central and upper catchment's areas of the Chira and Puira rivers, NW Peru (Foreign development aid of the Czech Republic.

2005-2007: Hydrogeology & balneology feasibility studies - Cajamarca and Churín, Peru (Foreign development aid of the Czech Republic, in collaboration with Aquatest.

### **Peer-reviewed papers coming out of this thesis**

Kopačková, V., Chevrel, S., Bourguignon, A., & Rojík, P., (2012): Application of high altitude and ground-based spectroradiometry to mapping hazardous low-pH material derived from the Sokolov open-pit mine, *Journal of Maps*, DOI:10.1080/17445647.2012.705544.

Kopačková, V., (submitted for *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*): Using multiple spectral feature analysis for quantitative pH mapping in a mining environment.

Mišurec, J. and Kopačková, V., Lhotáková, Z., Hanuš, J., Weyermann, J., Entcheva-Campbell, P., Albrechtová, J., (2012): Utilization of hyperspectral image optical indices to assess the Norway spruce forest health status, *J. Appl. Remote Sens.* 6(1), 063545. doi:10.1117/1.JRS.6.063545.

Kopačková, V., Mišurec, J., Lhotáková, Z., Oulehle, F., Albrechtová, J., (submitted for *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*): Using multi-date high spectral resolution data to assess the physiological status of macroscopically undamaged foliage on a regional scale.

Kopačková, V., Lhotáková, Z., Oulele, F., Albrechtová, J., (under review): Assessing forest health via linking the geochemical properties of a soil



profile with the biochemical vegetation parameters, International Journal of Environmental Science and Technology.

### **Other peer-reviewed papers**

Kupková L, M Potůčková, K Zachová, Z Lhotáková, V Kopačková & J Albrechtová, (2012): Chlorophyll determination in Silver Birch and Scots Pine foliage from heavy metal polluted regions using spectral reflectance data. *EARSeL eProceedings*, 11(1): 64-73.

Kopačková, V., Rapprich, V., Zelenková, K., Šebesta, J.: Slope dependent morphometric analysis as a tool contributing to reconstruction of volcano evolution, (2011): In *Dar I.A: Earth and Environmental Sciences*, s. 220-240. – InTech Open Access, ISBN 978-953-307-468-9.

Kopačková, V., Rajchl, M., Harbula, J., Laufek, F., Nývlt, D., Hroch, T., Hanuš, J. (2010): Detection of ENSO-induced changes based on analyses of multitemporal earth observation data: a study from NW Peru. *PHOTO-INTERPRÉTATION EUROPEAN JOURNAL OF APPLIED REMOTE SENSING*, 2, 64-78, 95-101.

Matějček, L., Kopačková, V. (2010): Changes in Croplands as a Result of Large Scale Mining and the Associated Impact on Food Security Studied Using Time-Series Landsat Images. *Remote Sensing* 2, 6, 1463-1480. ISSN 1424-8220. DOI 10.3390/rs2061463.

Rapprich, V., Erban, V., Fárová, K., Kopačková, V., Bellon, H., Hernández, W. (2010): Volcanic history of the Conchagua Peninsula (eastern El Salvador). *Journal of Geosciences* 55, 2, 95-112. ISSN 1802-6222. DOI: 10.3190/jgeosci.069.

### **Peer-reviewed proceedings**

Kopačková, V., Chevrel, S., Bourguignon, A., (2011): "Spectroscopy as a tool for geochemical modeling" in *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II*, edited by Ulrich Michel, Daniel L. Civco, *Proceedings of SPIE Vol. 8181* (SPIE, Bellingham, WA 2011) 818106, DOI:10.1117/12.898404.

Harbula, J., Kopačková, V., (2011): "Air pollution detection using MODIS data" in *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II*, edited by Ulrich Michel, Daniel L. Civco, *Proceedings of*

SPIE Vol. 8181 (SPIE, Bellingham, WA 2011) 81811E,  
DOI:10.1117/12.898107.

Kopačková, V. , Bourguignon, A., Chevrel, S., Koubová, M., Rojík, P., (2009):  
Effect of mineralogical and geochemical properties on reflectance  
properties of waste from Sokolov open pit lignite mine, Czech Republic,  
Mine Closure 2009 - A.B. Fourie, M. Tibbett (eds), Australian Centre for  
Geomechanics, Perth, pp 569-580, ISBN: 978-0-9804185-9-0.

Chevrel, S., Kopačková, V., Bourguignon, A., Rojík, P., Metelka, V., (2008):  
Monitoring Hazardous Wastes Using Space-borne and Ground-based  
Spectroradiometry - Sokolov Lignite Mines : Czech Republic, Mine  
Closure 2008, proceedings 3rd International Seminar on Mine Closure,  
14-18 October 2008, Johannesburg, South Africa, Fourrier A., Tibbet  
M., Weiersbye I., Dye P. Eds, Australian Centre for Geomatics, Perth, pp  
651- 662, ISBN: 978-0-9804185-6-9.

#### **Selected presentations at international conferences**

Veronika KOPAČKOVÁ, Daniel NÝVLT and Michal RAJCHL, (2012):  
Utilization of ASTER VIS/SWIR/TIR time series data for mapping  
dynamics of desert sediments, 34th International Geological Congress,  
Brisbane, Australia, 5-10 August, 2012.

Veronika KOPAČKOVÁ, Jan MIŠUREC, Kateřina ZELENKOVÁ, Stephane  
CHEVREL, Anne BOURGUIGNON, Anna BROOK, Eyal BEN-DOR,  
Christoph EHRLER, Christian FISCHER (2012): Application of mineral and  
image-based spectroscopy to mapping surface pH at open pit lignite  
mines: Multi-temporal approach, 34th International Geological  
Congress, Brisbane, Australia, 5-10 August, 2012.

Veronika Kopačková, Stéphane Chevrel, Anne Bourguignon (2012):  
MAPPING HAZARDOUS LOW-PH MATERIAL IN MINING ENVIRONMENT:  
MULTISPECTRAL AND HYPERSPECTRAL APPROACHES. IEEE International  
Geoscience and Remote Sensing Symposium "Remote Sensing for a  
Dynamic Earth", IGARSS 2012 proceedings, 2695-2698, ISBN: 978-1-  
4673-1159-5.

Lucie Kupková, Markéta Potůčková, Michaela Buřičová, Veronika  
Kopačková, Zuzana Lhotáková, Jana Albrechtová (2012):  
DETERMINATION OF LIGNIN CONTENT IN NORWAY SPRUCE FOLIAGE

USING NIR SPECTROSCOPY AND HYPERSPECTRAL DATA. IGARSS 2012 proceedings, 4190-4193, ISBN: 978-1-4673-1159-5.

Veronika Kopačková, Jan Franěk, Kryštof Verner, Karel Martínek, Michal Tesař, (2011): Structural approach combining ALOS PALSAR linear feature extraction with field structural and geophysical investigations, Geological Remote Sensing Group Workshop: Advances in Geological Remote Sensing (Including the Oil and Gas Earth Observation Group Workshop), 7-9 December 2011, ESA/ESRIN, Frascati, Italy.

Mišurec J., Kopačková V., Lhotáková Z., Albrechtová J., Hanuš J., Weyermann J. (2011): A comparison of different approaches to empirical modeling for retrieval of leaf pigments content of Norway spruce canopies from HyMap airborne hyperspectral image data. 1st Workshop on Forestry, Abstract book, 2nd-3rd June 2011, Prague, Czech Republic, s. 8-9. European Association of Remote Sensing Laboratories.

Mišurec J., Kopačková V., Lhotáková Z., Albrechtová J., Hanuš J. (2011): Estimation of biochemical and geochemical variables in Norway spruce forest stands from hyperspectral image data. 7th EARSeL Workshop of the Special Interest Group in Imaging Spectroscopy, 11th - 13th April 2011, University of Edinburgh, Scotland, UK, s. 71. European Association of Remote Sensing Laboratories. Edinburgh, United Kingdom.

Veronika Kopačková, Stephane Chevrel, Anna Burginon, Petr Rojík, (2011): Quantitative determination of selected geochemical variables from hyperspectral data: a case study from Sokolov open pit lignite mine. 4th EARSeL SIG Workshop on Land Use Land Cover, Prague. June 01-03, 2011.

V. Kopačková, S. Chevrel, A. Bourguignon (2011): EFFECTS OF HEAVY METAL ABUNDANCE AND SPECIATION ON REFLECTANCE PROPERTIES OF POLY-PHASE MATERIAL OF WASTE ROCK DUMPS, 7 th EARSeL Workshop of the Special Interest Group in Imaging Spectroscopy 11 th to 13 th April 2011 University of Edinburgh, Scotland, UK

Kopačková, V. , Albrechtová, J. , Lhotáková, Z. , Hanuš, J. , Malenovský, Z. , Jung, A. , Glasser, C. , Chevrel, S. , Burginon, A. , Salbach, C. (2010): HYPSON (HYPERSPECTRAL SOKOLOV): A MULTIDISCIPLINARY HYPERSPECTRAL PROJECT ASSESSING MINING RELATED IMPACTS BY

- MEANS OF IMAGE SPECTROSCOPY. In Lacoste-Francis H.: Proceedings of Hyperspectral 2010 Workshop, svazek SP-683. s. 1-7. ESA Communications, ESTEC. Noordwijk. ISBN 978-92-9221-247-6.
- Nývlt D., Kopačková V., Láška K. and Engel Z. (2010): Recent changes detected on two glaciers at the northern part of James Ross Island, Antarctica, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-8102, 2010.
- Nývlt, D., Láška, K., Kopačková, V., Engel, Z. (2009): Glacio-meteorological measurements on two glaciers at the northern part of James Ross Island, Antarctica. In Barták, M., Hájek, J., Váczi, P.: Structure and function of Antarctic Terrestrial Ecosystems. Oct. 22-23, Book of Abstracts and Contributed Papers, s. 7-8. Masarykova Univerzita, Brno. Brno. ISBN 978-80-210-4987-1.
- 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 International Geological congress, Oslo, August 6-14, 2008, presentation at session: GTR-04 Hyperspectral remote sensing and image spectroscopy, CD-ROM
- Kopačková, V., Rajchl, M., Nývlt, D., Šebesta, J., Hroch, T., Vít, J., (2008): Detection of changes in the Chira and Piura lower - catchment's areas, Sechura desert - Peru, based on spatial and spectral analyses of multitemporal Earth observation data. Geological mapping using satellite techniques, 33rd IGC Congress in Oslo 6. August 2008, CD-ROM
- Bourguignon, A., Chevrel, S., Kopačková, V., (2008): Utilisation couplée d'ENVI et d'ArcMap pour l'évaluation de l'impact environnemental des mines de lignite de Sokolov (République Tchèque), SIG2008, Conférence francophone ESRI, Versailles, 1-2 octobre 2008, CD-ROM
- Rajchl, M., Nývlt, D., Kopačková, V., Šebesta, J., Vít, J., Hroch, T. (2008): GEOMORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE PIURA RIVER FLUVIAL FAN, NORTHERN PERU, PRELIMINARY STUDY. Abstract Volume, XIII Latin-American Geological Congress, XIV Peruvian Geological Congress.
- Chevrel, S., Kopačková, V., Bourguignon, A., Rojík, P., Metelka, V., (2008): Application of high altitude and ground-based spectroradiometry in the

monitoring of hazardous waste derived from Sokolov open-pit mine, proceedings 10th International Mine Water Association congress, Karlovy Vary, June 2- 5, 2008, Rapantova N & Hrkal Z. Eds, Technical University of Ostrava publisher, pp 371 – 374

Kopačková, V., Rambousek, P., (2007): Mining remote sensing and its role in implementation of Czech and EU directives - a case study for Sokolov open pit mine. Extractive Industry and the Environment in the Central Europe EIECE 2007 - Conference Proceedings, pp. 1-5. ISSN 1802-5870.

Kopačková, V. - Nývlt, D. - Šebesta, J. (2006): Building the Information System of Geohazards in Peru. In ESRI, Redlands: ESRI Map Book, pp. 76. ESRI PRESS. USA, California. ISBN 1-58948-133-X.

### **Text books, teaching courses**

Martínek, K. - Kopačková, V. - Štych, P. - Bravený, L. (2007): "GIS a DPZ pro geology/GIS and Remote Sensing for geologist" 150 s/150 p. Czech Space Office, o. p. s.. Kateřinská 10, 128 00 Prague 2.

Kopačková, V., (2008): Statistical landslide susceptibility zonation - a case study in the northern part of El Salvador: In Van Westen, C. et al.: Curso sobre Alertamiento y Evaluación de Riesgos por Deslizamientos en Centro América. Antigua, Guatemala, 2. - 6. 6. 2008, CD-ROM. ITC, Holland.