

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Charles University in Prague
Faculty of Science**

**Univerzita Toulouse III
Paul Sabatier
University of Toulouse III
Paul Sabatier**

**Ústav geologie a paleontologie
Institute of Geology and Palaeontology**

Studijní program: Geologie - geologie se
zaměřením

Study program: Geology - geological
sciences

**Geologie a životní prostředí Toulouse
Geosciences Environment Toulouse**

Specializace: Geologie - dálkový
průzkum Země

Specialty: Geology - remote sensing

Autoreferát disertační práce
Summary of the Ph.D. Thesis



**Aplikace geofyziky a dálkového průzkumu Země ve studiu regolitu a
geologické stavby Burkiny Faso, Západní Afrika**

**Geophysical and remote sensing methodologies applied to the analysis of
regolith and geology in Burkina Faso, West Africa**

Václav Metelka

Školitelé/Supervisors: Josef Ježek., Mark W. Jessell

Školitelé-konzultanti/Supervisors-consultants: Karel Martínek, Dominique Chardon

Praha, 27. 6. 2011

Abstrakt

Nejstarší části kontinentů, takzvané kratony, jsou v současnosti centrem zájmu celosvětového výzkumu nejen proto, že jejich znalost je nezbytná pro porozumění raného vývoje Země, ale také vzhledem k jejich značnému významu v oblasti těžby nerostných surovin. Výsledky této práce přispívají k pochopení geologického a geomorfologického vývoje Západoafrického kratonu. K jejich získání bylo použito integrované analýzy leteckých geofyzikálních dat, satelitních dat dálkového průzkumu Země a dat získaných během terénních měření v západní části Burkiny Faso, v oblastech zelenokamenových pásů Houndé, Boromo, Banfora a přidružených granitoidních domén.

Výsledky tohoto komplexního přístupu ukazují, že granitoidní území západní Burkiny Faso tvoří větší množství malých až středně velkých plutonů. Pomocí magnetometrických dat byly zpřesněny zejména tvary těchto intruzivních těles. V oblasti západní Burkiny Faso můžeme definovat tři deformační fáze (D1-D3). Stratigrafická korelace provedená mezi zmíněnými zelenokamenovými pásy na základě výskytu jednotky megakrystických bazaltů nasvědčuje dřívějšímu propojení obou pásů. Penetrativní struktury D1 vzniklé v režimu vz. až zsz. orientované komprese jsou obvykle přetištěny transkurentními střížnými zónami D2, což je dobře viditelné i v magnetických datech. Nově objevené i stávající střížné zóny S2 představují perspektivní oblasti pro průzkum ložisek zlata. Regionální strukturní stavba vznikala během koaxiální komprese kompetentních vulkanických hornin současně s vmísťováním granitoidních těles. Poslední deformační fáze D3 je zřejmě pozdně Eburnská nebo náleží až k Panafrické orogenezi.

Mineralogické složení horninových a regolitových povrchů lze studovat, metodami dálkového průzkumu Země pomocí viditelné a infračervené spektroskopie. Spektra hornin a z nich odvozených regolitových materiálů naměřených v terénu a laboratoři v rozsahu 0,35 až 2,5 μm tvoří základ nové spektrální knihovny. Horninová spektra ukazují vliv typického semi-aridního zvětrávání. Fe-OH a Mg-OH absorpční pásy byly pozorovány u mafických a intermediálních vulkanických hornin, granodioritů a tonalitů. Al-OH absorpční pásy jsou typické nejen pro vulkanosedimentární a sedimentární horniny, ale také pro regolitové povrchy. Absorpční pásy související s obsahem železa byly nalezeny téměř ve všech měřených materiálech. Spektra půd částečně odpovídají minerálnímu složení zvětralých hornin.

Data letecké gamaspektrometrie, data ze senzorů ASTER, Landsat a polarimetrická radarová data byla, společně s parametry odvozenými z digitálního modelu reliéfu SRTM, použita pro popis a analýzu čtyř různých regolitových terénních jednotek v oblasti Gaoua. Ke klasifikaci bylo využito metody neuronových sítí, která byla srovnána s metodou maximální věrohodnosti. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo kombinací dat letecké gamaspektrometrie a dat odvozených z digitálního modelu reliéfu. Klasifikace přispěla k celkovému zpřesnění prostorového rozdělení jednotlivých celků a aktualizaci jejich tvarů. Tento přístup ukazuje potenciál neuronových sítí v integrované analýze dat letecké geofyziky a dat dálkového průzkumu Země při mapování regolitových terénních celků.

Abstract

The oldest parts of continents, so-called cratons, are the focus of worldwide research not only because they represent primary constraints for our understanding of the early evolution of the Earth, but also because of their significant mineral potential. This work contributes to the understanding of the geological and geomorphological evolution of the West African Craton, by an integrated analysis of airborne geophysical and satellite remote sensing data constrained by field structural, lithological, geophysical, and geomorphological observations acquired around Houndé, Boromo and Banfora greenstone belts and associated granitoid domains in western Burkina Faso.

The results of this integration suggest that the granitoid domains of western Burkina Faso are formed by numerous small- to medium-sized plutons, and the magnetic data provided a better definition of the actual pluton shapes. Airborne gamma ray spectrometry data aided in the mapping process in areas with less regolith cover. Three deformation events (D1-D3) can be distinguished in western Burkina Faso. A megacrystic tholeiitic basalt unit allowed us to establish stratigraphic correlations between the two belts and propose a crustal scale anticline (D1). The D1 penetrative structures, resulting from an E-W to WNW-oriented compression are generally overprinted by the D2 transcurrent shear zones, which is well visible in the magnetic data. Previously unreported and already known S2 shear zones represent prospective areas for gold exploration. The regional-scale system geometry was controlled by coaxial shortening of stiffer volcanic units and coeval magma input. The last D3 N-S compression is either late-Eburnean or perhaps even Pan-African.

The mineralogical composition of rocks and derived regolith surfaces may be assessed by visible and infrared spectroscopy. A new spectral library has been acquired consisting of in situ and laboratory 0.35 μm to 2.5 μm spectra of rocks and derived regolith materials. The reflectance spectra of rocks show the influence of typical arid to semi-arid weathering. Fe-OH and Mg-OH absorption features are observable in the mafic and intermediate volcanic rocks as well as in the granodiorites and tonalites. Al-OH absorptions are typical for volcano-sedimentary and sedimentary rocks, and regolith materials. Ferric and ferrous iron absorptions were observed in most of the sampled materials. The spectra of soils partially reflect the mineral composition of the weathered rock surfaces.

Airborne gamma ray spectrometry data, ASTER, Landsat and polarimetric radar data, along with morphometric parameters derived from the SRTM digital elevation model, were used to characterize four different regolith landform units in the Gaoua area. An artificial neural-network classification was applied to the dataset and compared with a maximum likelihood classifier. The best results were obtained with a combination of gamma-ray spectrometry data and derivatives of the digital elevation model. The classification contributed to an increase in the accuracy of the distribution of the classified units and to an actualization of their respective shapes. The approach demonstrates the potential of neural networks for the combined analysis of airborne geophysical and remote sensing data in regolith landform mapping.

1. Úvod

Nejstarší části kontinentů, takzvané kratony, jsou centrem zájmu celosvětového výzkumu nejen proto, že obsahují klíčové informace o raném vývoji planety Země, ale také pro jejich význam v oblasti nerostných surovin. Západoafrický štít (Bessoles, 1977) zůstává i přes početné studie jedním z nejméně prozkoumaných kratonů světa, zejména pak ve srovnání s jeho ekvivalenty nacházejícími se v Austrálii a Kanadě. Kromě svého ekonomického významu je tento kraton zvláštní právě tím, že vznikl v době, kdy na Zemi zřejmě docházelo k aktivaci procesu deskové tektoniky v podobě, která je nám dnes známá. Stabilní zemská kůra nacházející se v tropickém klimatu dovolila vzniknout silné vrstvě regolitu (zvětralinového pláště), která pokrývá většinu povrchu štítu Leo-Man. Regolit představuje jednu z největších překážek v geologických výzkumech a geochemické prospekci, nicméně jeho studium napomáhá v tektono-geomorfních výzkumech souvisejících s vývojem kontinentů.

Interpretace magnetometrických, gravimetrických, gamaspektrometrických dat a dat dálkového průzkumu Země, ověřené pomocí terénních pozorování, byly s úspěchem použity při studiu geologické stavby i analýzách regolitových povrchů v Prekambrických terénech (e.g. Jaques et al., 1997; Wilford et al., 1997; Craig, 2001; Peschler et al., 2004; Direen et al., 2005; Martelet et al., 2006; Schetselaar et al., 2007; Teruiya et al., 2008). Integrace dat letecké geofyziky a dálkové průzkumu země poskytuje potřebný odstup při regionálním geologickém mapování, díky synoptickému snímání zemského povrchu, přičemž řada geofyzikálních metod je schopna proniknout i mocnou vrstvou regolitu nebo vegetačním pokryvem.

Mechanismy růstu kontinentální kůry během archaika a spodního proterozoika jsou tématem vášnivých debat již po několik desetiletí (Windley, 1992; de Wit a Ashwal, 1997; Condie, 1998). Starobylé oblasti štítů se obvykle skládají ze zelenokamenových pásů a granitoidních domén postižených střížnými zónami korového měřítka. Mnoho studií poukazuje na fakt, že desková tektonika byla činná již ve středním Archaiku (Cawood et al., 2006; Condie, 2008), nicméně existuje také řada názorů, které upřednostňují takzvanou vertikální tektoniku jako dominantní proces při tvorbě kontinentální kůry až do spodního proterozoika (Pons et al., 1995; Vidal et al., 2009). Pro zodpovězení této zásadní otázky a posunutí úrovně znalostí o vývoji Západoafrického kratonu byly studovány tři spodně proterozoické zelenokamenové pásy (2200–2000 Ma) v západní Burkině Faso.

Nezbytným podkladem pro analýzu multispektrálních či hyperspektrálních dat dálkového průzkumu Země jsou terénní měření viditelné a infračervené spektrometrie. Výsledky měření slouží pro kalibrace, ověřování výsledků klasifikací nebo jako vstupní data pro odvozování modelů (Milton et al., 2009). Projekty jako spektrální knihovna ASTER 2.0 (Baldrige et al., 2009), spektrální knihovna USGS (Clark et al., 2007), nebo spektrální knihovna půd (ICRAF-ISRIC, 2010) ukazují na rostoucí zájem o spektrální data. Tyto knihovny jsou velmi často tvořeny laboratorními měřeními nezvětralých horninových povrchů, což znesnadňuje jejich použití, neboť zvětralé povrchy vykazují odlišné spektrální vlastnosti (Cloutis, 1992; Rivard et al., 1992; Rowan et al., 2004).

Horniny Západoafrického kratonu jsou pokryté silnou vrstvou regolitu, která vznikla v důsledku dlouhodobého lateritického zvětrávání. Pojem regolit představuje veškerý materiál od zemského povrchu až po nezvětralou horninu (Taylor a Eggleton, 2001). Regolit v oblasti Západní Afriky představuje důležitý zdroj nerostných surovin (Wright et al, 1985; Lavaud et al, 2004). Jeho studium může být využito při tektono-geomorfních analýzách vývoje Západní Afriky (Chardon et al, 2006; Burke a Gunnell, 2008), nicméně regolit představuje také potencionální komplikace zejména při geochemické prospekci (Taylor a Eggleton, 2001). Mapy regolitových jednotek, které jsou běžně používány například v Austrálii (Pain et al., 2007), pro většinu území Západní Afriky vůbec neexistují. Mapování regolitových geomorfologických jednotek lze provést na základě integrace dostupných dat vizuálně v prostředí GIS (Craig et al., 1999; Woolrych a Batty, 2007) nebo pomocí automatických klasifikací (Wilford et al., 2007). Metody automatické klasifikace (metoda neuronových sítí a metoda maximální věrohodnosti) regolitových jednotek byly zhodnoceny v oblasti středně až hustě pokryté vegetačním pokryvem v jihozápadní Burkině Faso.

2. Cíle práce

Cíle doktorské práce lze rozdělit do čtyř okruhů, kterým odpovídají jednotlivé kapitoly.

I. Provedení integrované analýzy založené na interpretacích terénních měření, geofyzikálních dat a dat dálkového průzkumu Země. Vymapování regionálních strukturních prvků, litotektonických jednotek a vytvoření nové litostrukturní mapy studované oblasti. Zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých metod při geologickém mapování hluboce zvětralých oblastí Západní Afriky.

Kapitola I - Metelka, V., Baratoux, L., Naba, S., Jessell, M.W. – *A geophysically constrained litho-structural analysis of the Eburnean greenstone belts and associated granitoid domains, Burkina Faso, West Africa* - “podáno Precambrian research”

II. Navržení nového geotektonického modelu studované oblasti. Tento model bude navržen na základě nových geochemických dat, detailního strukturního mapování, modelování gravimetrických dat a interpretacích odvozených při integrované analýze dat v první kapitole. Vyšetření vzájemných vztahů mezi jednotlivými zelenokamenovými pásy a posouzení možných mechanismů vmístění granitových plutonů.

Kapitola II - Baratoux, L., Metelka, V., Naba, S., Jessell, M.W., Grégoire, M., Ganne, J. - *Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the Eburnean orogeny (~2.2–2.0 Ga), Burkina Faso, West Africa* - podáno “Precambrian research”

III. Změření viditelných a infračervených spektrálních vlastností litologických jednotek, regolitových povrchů a vytvoření spektrální knihovny. Posouzení vlivu zvětrávání na spektrální vlastnosti hornin a stanovení spektrálních vlastností půd a regolitových povrchů. Zhodnocení možností viditelné a infračervené spektroskopie v mapování vlastností povrchů ve studované oblasti.

Kapitola III - Metelka, V., Baratoux, L., Naba, S., Jessell, M.W. - *Visible and infrared spectral library of Precambrian granite-greenstone terrains in Burkina Faso,*

West Africa – připraveno k podání do “Earth surface processes and landforms“ (knihovna volně přístupná ke stažení na webové stránce: <http://www.geology.cz/extranet-eng/geodata/remote-sensing>).

IV. Navržení vhodné metody pro automatickou klasifikaci regolitových jednotek a posouzení relativní důležitosti různých zdrojových dat.

Kapitola IV Metelka, V., Baratoux, L., Jessell, M.W., Barth, A., Ježek, J., Naba, S. - *Regolith landform mapping using airborne geophysics and remote sensing data in a neural network, Burkina Faso, West Africa* – připraveno k podání do “Remote sensing of environment”

3. Materiál a metodika

Pro interpretaci litostrukturní stavby byl použit integrovaný přístup v systému GIS, kde byla upravená data analyzována vizuálně. Jako omezující parametry při interpretacích byla využita nově získaná existující terénní pozorování. Tato pozorování obsahovala litologické, stratigrafické, strukturní a petrofyzikální informace. Redukce na pól byla u magnetometrických dat provedena metodou pseudoinklinace (Li, 2008). Byla odvozena vylepšená a upravená data, která zahrnovala první vertikální derivaci, horizontální derivaci a tilt derivaci magnetických dat (Milligan a Gunn, 1997). Data letecké gamaspektrometrie vyhlazená metodou NASVD (Noise-Adjusted Singular Value decomposition) (Hovgaard a Grasty, 1997) a absolutně kalibrovaná na koncentrace K, eTh a eU byla použita jako vstupní vrstvy, společně s odvozenými podíly jednotlivých radiogenních prvků a transformací dat pomocí metody hlavních komponent. Tato data byla využita ve spojení s daty digitálního modelu terénu při mapování geologie a také pro zhodnocení vlivu regolitu na mapované jednotky. Gravimetrická data získaná v Západní Africe (Albouy et al., 1992) opravená na Fayovu a Bouguerovu korekci (použitá hustota 2.67 g/cm^3) byla gridována s krokem 3000 m na výslednou mapu Bouguerových anomálií.

Strukturní mapování bylo provedeno standardními postupy. Pro identifikaci a rozdělení struktur do tří deformačních fází bylo využito detailního strukturního mapování a analýz stereoplotů. Interpretace geofyzikálních dat napomohla při odvození litostrukturní stavby oblasti. Jednotlivé litologické jednotky byly dále detailně petrograficky a geochemicky studovány. Geochemické analýzy zahrnovaly analýzy celkové horniny 23 vzorků pomocí ICP-AES na obsah hlavních a stopových prvků. Standardní diagramy a klasifikace (Irvine a Baragar, 1971; Middlemost, 1994) byly použity pro rozdělení vulkanických hornin do několika skupin v programu GCDKit (Janoušek et al., 2006). Analýzy stopových prvků normalizovaných na chondrit (McDonough a Sun, 1995) byly zhodnoceny za stejným účelem. Modelování gravimetrických dat (Peschler et al., 2004) bylo provedeno podél tří profilů vedených napříč zelenokamenovými pásy. Při modelování bylo použito metody $2\frac{3}{4} D$ modelování (Popowski et al., 2009), která dovoluje variabilní parametry modelovaných těles i ve směru kolmém na modelovaný profil až do určené vzdálenosti (10 km).

Analýzy spektrálních vlastností hornin a regolitových jednotek byly provedeny in-situ a v laboratoři. Rozmístění vzorkovaných míst bylo navrženo tak,

aby bylo možné zahrnout všechny přítomné litologie a jejich zvětraliny. Měření půd proběhla na místech, kde bylo možné spolehlivě určit zdrojovou horninu. Spektra byla měřena na přístroji ASD FieldSpec Pro FR v rozmezí 0,35 μm až 2,5 μm jako hemisférické konické reflektanční faktory (Milton et al., 2009). Panel Labsphere spectralon byl použit jako referenční reflektanční materiál. Každý vzorek byl měřen na třech různých místech kvůli rozdílné geometrii vzorků a lokálním změnám v mineralogickém složení. Mineralogické složení zvětralých povrchů a krust bylo ověřováno pomocí rentgenové difraktometrie na přístroji INEL CPS-120. Vzorky byly odebrány z povrchu horniny pomocí elektrické vrtačky s diamantovým vrtákem jako 0,5-1,0 mm mocná vrstva. Kvalitativní analýza minerálních fází byla provedena na základě pozice a intenzity difrakčních čar. Spektrální data byla opravena na rozdíl mezi hodnotami z detektorů VNIR a SWIR1 aditivní metodou. Spektra byla následně vyhlazena pomocí Savitzky-Golay filtru (Savitzky a Golay, 1964). V knihovně jsou uložena vyhlazená i nevyhlazená data. Analýzy spekter zahrnovaly vyhodnocení spektrálních křivek zbařených jejich obálky (Clark a Roush, 1984) a SFF (spectral feature fitting) mapování za použití knihoven USGS (Clark et al., 2007) a ASTER 2.0 (Baldrige et al., 2009) jako zdroje referenčních dat.

Příprava dat pro automatické klasifikace regolitových povrchů zahrnovala několik kroků. Všechna data byla převzorkována na prostorové rozlišení 30 m. Data senzoru Landsat byla použita jako referenční vrstva. Viditelná a infračervená pásma senzorů Landsat a ASTER byla kalibrována na reflektanci (Richter, 1997). Termální pásma senzoru ASTER byla převedena na emisivitu pomocí algoritmu TES (Gillespie et al., 1996). Polarimetrická data ze senzorů Radarsat-2 a ALOS PALSAR byla transformována pomocí Pauliho dekompozice (Cloude et Pottier, 1996). Výsledná tři pásma byla geometricky opravena terénní korekcí založenou na metodě SAR simulace (Schreier, 1993). Výškový model SRTM byl převzorkován metodou Hutchinsona (1989). Z takto upraveného modelu byly odvozeny vrstvy sklonu svahu, hrubosti sklonu svahů, zakřivení povrchů (Zeverbergen a Thorne, 1987), relativního reliéfu a hypsometrického integrálu (Pike a Wilson, 1971). Byla odvozena říční síť a vzdálenosti od hlavních toků, jakožto i výška terénu nad hlavními toky. Data letecké gamaspektrometrie byla gridována metodou minimální křivosti (Briggs, 1974). Byly vypočteny podíly eTh/K a eU/K. Pro klasifikace bylo použito metody neuronových sítí (An et al., 1995; Leverington, 2011), která byla porovnána s klasifikací metodou maximální věrohodnosti (Campbell, 1996). Pro každou klasifikovanou třídu byla vytvořena nová síť. Výsledky byly posléze zkombinovány tak, že obrazové body byly přiřazeny třídě s nejvyšší pravděpodobností zařazení do příslušné třídy. Zhodnocení přesnosti klasifikací bylo provedeno pomocí chybové matice (Congalton a Green, 2009).

4. Výsledky a diskuse

Integrovaný přístup při studiu geologické stavby západní Burkiny Faso napomohl k objevení nových struktur regionálního měřítka. Data letecké magnetometrie sloužila k mapování struktur a litologických jednotek v prvních stovkách metrů pod povrchem, zatímco průzkum povrchových jevů včetně rozmístění

regolitových jednotek byl proveden na základě dat letecké gamaspektrometrie a dálkového průzkumu Země. Ukázalo se, že granitové domény jsou tvořeny nejméně čtyřmi typy intruzí (ME1-ME4), což bylo potvrzeno v rámci interpretace letecké magnetometrie. Tyto čtyři typy odpovídají granitoidním suitám nalezenými v terénu: tonality-trondhjemitu-granodiority bohaté na Na (ME1), granodiority a granity bohaté na Na (ME2), granity bohaté na K (ME3) a gabra (ME4). Litologické jednotky zelenokamenových pásů, obsahující gabra, basalty, andezity a vulkanosedimentární-sedimentární horniny, byly vymapovány na základě interpretací letecké magnetometrie a gamaspektrometrie. Sedimenty typu Tarkwa, které se vyznačují nízkou magnetickou susceptibilitou. V některých oblastech bylo možno rozlišit penetrativní foliace S1 od střížných zón S2 a to v datech letecké magnetometrie i v terénu. Reliktní vrásy F1 byly rozpoznány v regionálním měřítku v pásu Houndé a Boromo. Tyto vrásy mohou být běžně pozorovány na výchozech ve studované oblasti. Nově bylo vymapováno množství střížných zón S2, z nichž jsou důležité zejména střížné zóny regionálního měřítka: Boromo-Poura, West Batié, Boni, Ouango-Fitini, Bossié a Greenville-Ferkessedougou-Bobo Dioulasso. Struktury D2 představují perspektivní oblasti pro průzkum ložisek zlata. Data letecké magnetometrie se ukázala jako nejvhodnější soubor dat pro interpretace litostrukturní stavby až do hloubky několika set metrů a to zejména v oblastech s mocnou vrstvou regolitu. Data letecké gamaspektrometrie a data dálkového průzkumu Země představují méně efektivní metody. Integrovaní gamaspektrometrických dat s digitálním modelem reliéfu se lépe hodí pro mapování regolitových jednotek.

Geochemické vlastnosti vulkanických hornin, včetně basaltů a četných těles intermediárních, vápenatoalkalických vulkanitů (2200–1700 Ma), naznačují afinitu k horninám typickým zejména v oblastech dnešních vulkanických oblouků. První intruzivní tělesa tonalitů-trondhjemitů-granodioritů (2190–2170 Ma) jsou pravděpodobně spojená se subdukcí oceánské kůry (Martin, 1994; Martin et al., 2005) nebo s tavením části mafické spodní kůry. Díky strukturním, geochemickým a detailním geologickým pozorováním (vymapování jednotky megakrystických basaltů) bylo možné provést korelaci mezi východní částí pásu Houndé a západní částí pásu Boromo. Tyto dva pásy jsou zřejmě spojeny ve vrásové struktuře korového měřítka. Vrásnění litologických jednotek zelenokamenových pásů započalo již během první fáze deformace D1 (~2160–2120 Ma) a bylo doprovázeno četnými syntektonickými intruzemi granitoidních těles, která vykazují subvertikální magmatickou foliaci se strmě upadajícími lineacemi. Deformace D1 odpovídá vz. kompresi s převahou čistého stříhu. Vulkanické a vulkanosedimentární horniny v pásu Houndé jsou rozděleny střížnou zónou Boni, která prochází po celé délce pásu. V rámci této struktury byly uloženy (~2160–2120 Ma) sedimenty typu Tarkwa. Druhá deformační fáze se vyznačuje vznikem četných transkurentních střížných zón lokálního i regionálního měřítka, které postihují veškeré litologie a v různé míře i preexistující struktury. Charakter deformace D2 odpovídá transpresi s převahou jednoduchého stříhu. Granitoidní intruze hrály důležitou roli v průběhu obou fází Eburnské orogeneze. Jejich důležitost je převážně v přínosu nového magmatu a dále v akomodaci laterální koaxiální komprese kompetentnějších vulkanických hornin

zelenokamenových pásů. Vulkanické horniny postupně zformovaly vrásu korového měřítka, která ze severu na jih dosahuje délky přes 400 km. Komprese a vrásnění bylo v regionálním měřítku podporováno neustálým přísunem nového granitoidního materiálu. Poslední fáze deformace D3 je nejspíše pozdně Eburnská, ale může náležet i k Panafrické orogenezi. Tato deformace odpovídá sj. kompresi, která dala vzniknout subvertikální vz. orientované krenulační kliváži a sj. ploše upadajícím násunovým strukturám.

Viditelné a infračervené spektrální vlastnosti hornin jsou korelované s obsahem SiO_2 v hornině a s obsahem mafických minerálů. Skupina vulkanických hornin obsahující gabra, basalty a andezity je charakterizována diagnostickými absorpčními pásy molekulových vazeb Fe-OH a Mg-OH v chloritech, amfibolech a pyroxenech v oblasti 2,32 μm a 2,25 μm . Absorpce okolo 1,0 μm jsou spojené s železnatými ionty obsaženými v krystalové mřížce výše jmenovaných minerálů. Zvětralé povrchy vykazují celkově vyšší hodnoty reflektance a příkřejší profil spektrální křivky. Objevuje se nová absorpce v okolí 2,2 μm související s obsahem jílových minerálů. Zvýšená absorpce pod 0,6 μm je spojená s obsahem hematitu a goethitu. Vzorky náležící do skupiny tonalitů a granodioritů vykazují obdobné spektrální vlastnosti jako gabra. Větší rozdíly v měření reflektance těchto hornin mohou souviset s přítomností melanokrátních a leukokrátních pásků. Skupina granitů je charakterizována výraznější absorpcí v oblasti 2,2 μm , která pravděpodobně souvisí s povrchovou alterací vzorků. Alterovaným povrchům dominují u obou skupin absorpce kaolinitu/smektitu v oblasti 2,2 μm a goethitu s hematitem pod 1,0 μm . Vulkanosedimentární horniny se vyznačují Al-OH absorpcí okolo 2,2 μm , jejíž forma je variabilní od symetrického tvaru – muskovitu a ilitu až po asymetrický tvar kaolinitu/smektitu se sekundární absorpcí v oblasti 2,17 μm . Alterované povrchy jsou spektrálně podobné nezvětralým povrchům. Sedimenty pánve Taoudeni vykazují absorpce spojené s obsahem kaolinitu. Červené a žluté zbarvení pískovců pak napovídá obsahu hematitu a goethitu, což potvrdila i spektrální měření. Všechna spektra snímaných půd obsahují absorpce (v okolí 2,2 μm) spojené s přítomností jílových minerálů. Půdy vyvinuté na bazických a intermediárních horninách mají nižší celkovou reflektanci než půdy nacházející se na granitech. Obecně lze říci, že spektra půd odpovídají částečně spektrům zvětralých horninových povrchů. Železem bohaté regolitové materiály, které zahrnují durikrusty a volné nodule vykazují snadno odlišitelná spektra díky svému minerálnímu složení, kde převažují sekundární minerály železa (goethit/hematit).

V rámci automatických klasifikací regolitových povrchů bylo nejlepšího výsledku dosaženo metodou neuronových sítí s 11 vstupními vrstvami, mezi něž patřila data letecké gamaspektrometrie a data odvozená z digitálního modelu reliéfu. Celková přesnost klasifikace dosáhla 95,71% při koeficientu kappa 0,94. Třída vysokých/středních glaciis byla klasifikována dobře vzhledem k chybám v opomenutí i nesprávného zařazení do třídy. Dobrá rozlišitelnost této třídy je dána zejména jejími příznaky v gamaspektrometrických datech (vysoké hodnoty e_{Th} a $e_{\text{Th/K}}$). Do třídy reziduálních povrchů byly správně zařazeny všechny erozní hřbety a ostrovní hory. Aluviální sedimenty byly klasifikovány s největší přesností a to především díky jejich

jasnému vymezení v datech odvozených z digitálního modelu reliéfu. Třída nízkých glacis (zarovnaných povrchů složených z nezpevněných pedimentů) byla nejhůře klasifikovanou třídou. Spodní glacis jsou charakterizovány v gamaspektrometrických datech i datech odvozených z digitálního modelu reliéfu jako velice variabilní třída, která obsahuje směs povrchů různých vlastností. Pro klasifikaci, založenou na stejných vstupních datech, provedenou pomocí metody maximální věrohodnosti bylo dosaženo celkové přesnosti 91,55% při koeficientu kappa 0,88. Výsledky získané pomocí klasifikace metodou neuronových sítí byly ve všech zkoumaných scénářích vždy lepší než výsledky obdržené metodou maximální věrohodnosti. V rámci klasifikace metodou neuronových sítí nebyl pozorován vzrůst přesnosti klasifikace při postupném zahrnutí dalších vstupních vrstev. To může být způsobeno zejména vegetačním pokryvem a činností člověka, neboť tyto faktory významně ovlivňují data získaná multispektrálními či radarovými senzory a značně komplikují následné klasifikace. Je nutné konstatovat, že všechny výsledky přesnosti klasifikace se pohybují v rozmezí 91–96%. Existuje jediná výjimka, kterou tvoří klasifikace metodou maximální věrohodnosti založená na datech letecké gamaspektrometrie, digitálního modelu terénu a polarimetrických radarových datech. Zde celková přesnost klesla k 88,78% při koeficientu kappa 0,84.

5. Závěry

Cílem této práce je porozumění geologického vývoje a rozmístění regolitových jednotek pomocí metod založených na interpretacích geofyzikálních dat a dat dálkového průzkumu Země. Oblast výzkumu zahrnovala tři zelenokamenové pásy: Houndé, Boromo a Banfora s asociovanými granitoidními doménami. Studie zahrnovala výzkum geologických, petrofyzikálních a zejména spektrálních vlastností hornin. Součástí práce bylo i vytvoření nové geologické mapy celé oblasti a mapy regolitových jednotek v okolí města Gaoua.

Pomocí integrace vstupních dat z letecké geofyziky, dálkového průzkumu Země a terénních pozorování byla odvozena nová litostrukturní mapa západní Burkiny Faso. Litologické jednotky zelenokamenových pásů jsou lépe rozpoznatelné i pod mocnou vrstvou regolitu. V oblastech granitových domén byly rozlišeny čtyři druhy malých až středně rozsáhlých intruzí, což má důležitý dopad na koncepci předpokládaného geodynamického modelu. Bylo popsáno velké množství střížných zón regionálního měřítka. Analýza integrovaného souboru dat ukázala slibný potenciál pro mapování jiných regionů Západoafrického kratonu, které mohou být těžko přístupné nebo pokryté mocným zvětralinovým pláštěm.

Detailní studium litologií a strukturních prvků obsažených v zelenokamenových pásích a granitových doménách potvrdilo přítomnost tří hlavních kompresních fází deformace, které přispěly k utvoření nové pevninské kůry v rámci Eburnské orogeneze. Petrologická, strukturní, geochemická a metamorfnní pozorování ukazují na existenci jednoho nebo více vulkanických oblouků, které v rámci orogeneze kolidovaly. Desková tektonika musela být činná již v období spodního proterozoika, přestože mechanismy vzniku nové pevninské kůry mohly být odlišné od dnešních kolizních pochodů. Růst nové pevninské kůry může být tedy připsán regionálnímu

vrásnění vulkanických hornin, nicméně na celý proces mělo nemalý vliv i velké množství syntecktonických granitoidních intruzí.

Pro zlepšení výsledků interpretací multispektrálních a hyperspektrálních dat dálkového průzkumu Země bylo provedeno přes 700 měření hornin, regolitových povrchů a doplňkových měření vegetace, která tvoří novou spektrální knihovnu. Měřený spektrální rozsah (0,35 μm až 2,5 μm)dovoluje přímé porovnávání s daty ze senzorů ASTER a Landsat. Měřené povrchy vykazují typické prvky povrchového zvětvávání v semi-aridních oblastech. Vznik železitých krust a pouštních laků závisí na litologickém složení hornin, ale i na jejich texturních a strukturních vlastnostech. Variabilita ve spektrálních měřeních ukazuje na možnost rozlišení jednotlivých povrchů pomocí analýz hyperspektrálních dat. Knihovna obsahuje základní data pro další studie založené na analýzách dat dálkového průzkumu Země v Západní Africe.

Pomocí automatické klasifikace byly vymapovány čtyři hlavní kategorie regolitových povrchů - vysoké/střední glacis, reziduální povrchy, aluviální sedimenty a nízké glacis. Nejlepších výsledků klasifikace bylo dosaženo v rámci klasifikace jedenácti vstupních vrstev (gamaspktrometrická data, data odvozená z digitálního modelu reliéfu SRTM) pomocí metody neuronových sítí. Zahrnutí většího množství vstupních dat, včetně multispektrálních a polarimetrických dat, nevedlo k významnému zlepšení přesnosti klasifikací. Metoda neuronových sítí předčila v přesnosti metodu maximální věrohodnosti ve všech zkoumaných klasifikačních scénářích. Výsledná mapa je prostorově přesnější a poskytuje detailnější rozdělení terénu na mapované jednotky, zejména pak jednotky vysokých/středních glacis a reziduálních povrchů. Výsledná mapa může být použita při plánování geochemické prospekce nebo modelování geomorfologického vývoje oblasti.

Výsledky výzkumu popsané v této práci ukazují nezbytnost integrace všech dostupných zdrojů informací při geologickém mapování i analýzách regolitu v terénech Západní Afriky. Geologické studie prováděné v těchto oblastech mohou profitovat z možnosti analyzovat struktury velkých měřítek a schopnosti proniknout vrstvou regolitových zvětralin. Použité zdroje dat poskytují dostatečné informace pro popis regolitových jednotek, které pokrývají většinu území západoafrického kratonu. Se zvyšující se dostupností nových zdrojů dat a informací, které jsou v současné době uvolňovány a budou uvolňovány během příštích desetiletí, mohou být podobné postupy použity v jiných částech Západní Afriky i světa.

1. Introduction

The oldest parts of continents, so-called cratons, are the focus of worldwide research not only because they represent primary constraints for our understanding of the early evolution of the Earth, but also because of their significant mineral potential. Without underestimating the importance of previous studies, the West African shield (Bessoles, 1977) remains an under-researched craton compared to its geological equivalents in Australia and Canada. Apart from its economic importance, this particular craton formed at a turning point in the earth's history, when it started to develop the plate tectonics systematics we see today. The stable continental crust situated in the tropical zone allowed for prolonged weathering of all of the lithologies and resulted in a thick regolith mantle, which covers most of the Leo Man shield. The regolith cover presents a hindrance to geological studies and geochemical exploration, but also remains of great interest in tectono-geomorphic research of the evolution of continents.

Interpretations of magnetic, gravimetric, gamma ray spectrometry and satellite remote sensing data constrained by field observations proved to be efficient in deciphering the regional litho-structural hierarchies and assessing the distribution and characteristics of regolith landform units in Precambrian terrains (e.g. Jaques et al., 1997; Wilford et al., 1997; Craig, 2001; Peschler et al., 2004; Direen et al., 2005; Martelet et al., 2006; Schetselaar et al., 2007; Teruiya et al., 2008). The integration of geophysical and remote sensing data provides a synoptic view necessary to assess regional-scale structures. Furthermore, a number of geophysical methods penetrate even thick regolithic and vegetation cover.

The mechanisms of crustal growth during the Archean and Paleoproterozoic are subject of scientific debates for decades (Windley, 1992; de Wit and Ashwal, 1997; Condie, 1998). The ancient shields are typically composed of greenstone belts and granitoid domains affected by crustal scale shear zones. Numerous researches propose that plate tectonics operated already in the Mesoarchean (Cawood et al., 2006; Condie, 2008); while others favor vertical tectonics, as a dominant process of crustal growth up until the Paleoproterozoic (Pons et al., 1995; Vidal et al., 2009). To answer these questions and upgrade our knowledge of the formation of the West African Craton, three belts from the Paleoproterozoic domain (2200–2000 Ma) in western Burkina Faso were studied.

Infrared spectroscopic in situ measurements form an important component of any multispectral or hyperspectral remote sensing analysis regardless of the scientific discipline involved, providing vital data for calibration, ground truth assessment and modeling input parameters (Milton et al., 2009). Projects such as including ASTER 2.0 spectral library (Baldrige et al., 2009), USGS spectral library (Clark et al., 2007), or the globally distributed soil spectral library (ICRAF-ISRIC, 2010) have shown the growing need for data from spectral libraries. The libraries often constitute laboratory spectra, or only fresh rock samples, which limits the possibility of comparisons to be made with in situ weathered rocks (Cloutis, 1992; Rivard et al., 1992; Rowan et al., 2004).

The rocks of the West African craton are covered by a thick regolith mantle as a result of prolonged lateritic weathering. Regolith may be characterized as all material between the Earth surface and fresh basement rock (Taylor and Eggelton, 2001). The regolith in West Africa represents an important economic resource (Wright et al., 1985; Lavaud et al., 2004), a constraint on the regions tectono-geomorphic evolution (Chardon et al., 2006; Buke and Gunnell, 2008), and a hindrance to geochemical exploration techniques (Taylor and Eggelton, 2001). Regolith landform maps, which are regularly used in Australia (Pain et al., 2007) do not exist for most areas of West Africa. Regolith landform mapping may be conducted visually in GIS (Craig et al., 1999; Woolrych et Batty, 2007) or by automatic classification (Wilford et al., 2007). Automatic classification approaches (neural networks and maximum likelihood classification) to regolith landform mapping were evaluated in a moderately to densely vegetated region of southwestern Burkina Faso.

2. Aims of the study

The aims of the study may be divided into four sub-objectives, which correspond to the four chapters included in the thesis.

I. Perform an integrated analysis of field-based observations, geophysical, and remote sensing data. Determine the regional structures and major lithotectonic units utilizing all available data sources and create a new lithostructural map of the studied area. Evaluate the application of the different methods for both lithostructural mapping and regolith landform mapping in the zone of interest.

Chapter I - Metelka, V., Baratoux, L., Naba, S., Jessell, M.W. – *A geophysically constrained litho-structural analysis of the Eburnean greenstone belts and associated granitoid domains, Burkina Faso, West Africa* – submitted to “Precambrian research”

II. Propose a new geotectonic scenario with the help of new geochemical data, structural observations, gravity modeling, and interpretations stemming from the integrated analysis of available data. Examine the relationships between the greenstone belts and assess the mechanisms of granitoid pluton emplacement.

Chapter II - Baratoux, L., Metelka, V., Naba, S., Jessell, M.W., Grégoire, M., Ganne, J. - *Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the Eburnean orogeny (~2.2–2.0 Ga), Burkina Faso, West Africa* – submitted to “Precambrian research.”

III. Measure the spectral properties of different lithological units, regolith landform units and create a spectral library. Assess the effects of weathering on spectral properties of rocks and determine the spectral properties of soils and regolith materials. Evaluate the possibility of using visible and infrared spectroscopy in mapping surface properties in the studied area.

Chapter III - Metelka, V., Baratoux, L., Naba, S., Jessell, M.W. - *Visible and infrared spectral library of Precambrian granite-greenstone terrains in Burkina Faso, West Africa* – to be submitted to “Earth surface processes and landforms.” The dataset is available through the web page <http://www.geology.cz/extranet-eng/geodata/remote-sensing>.

IV. Propose a feasible method for automatic regolith landform mapping and evaluate the relative importance of different data sources.

Chapter IV - Metelka, V., Baratoux, L., Jessell, M.W., Barth, A., Ježek, J., Naba, S. - *Regolith landform mapping using airborne geophysics and remote sensing data in a neural network, Burkina Faso, West Africa* – to be submitted to “Remote sensing of environment.”

3. Material and methods

During the interpretations of geological structures we have utilized an integrated approach in GIS system where enhanced data were visually interpreted based on newly acquired and existing outcrop data. The field observations included lithological, stratigraphic, structural and petrophysical information. Reduction to the pole of the magnetic data was conducted via the pseudo-inclination method (Li, 2008). Enhanced grids were computed including vertical derivative, horizontal derivative, and tilt derivative (Milligan and Gunn, 1997). The NASVD (Noise-Adjusted Singular Value decomposition) (Hovgaard et Grasty, 1997) corrected absolutely calibrated gamma ray spectrometry data included grids of K, eU, eTh, derived ratio and principal component grids. These data were used conjointly with the SRTM digital elevation model in accessing the geology and regolith cover. Gravimetric data acquired in West Africa (Albouy et al., 1992). Free air and Bouguer corrections were applied to the data using 2.67 g/cm^3 as the reduction density. The data were gridded at 3000 m spatial resolution to produce a Bouguer anomaly grid.

Structural mapping was conducted according to standard procedures. Three deformation phases were identified based on the detailed structural mapping and analysis of stereoplots. The interpretation of geophysical data aided in the process of delineating the lithostructural framework of the area. The lithologies were studied in detail using petrography and geochemistry. The geochemical analyses included whole rock analyses of 23 selected samples using the ICP-AES for major and trace element concentrations. Standard diagrams and classification schemes proposed by (Irvine and Baragar, 1971; Middlemost, 1994) were used to classify the volcanic rocks into several groups in GCDkit (Janoušek et al., 2006). Analyses of trace element concentrations normalized to chondrite (McDonough and Sun, 1995) were examined in the process. Forward modeling of gravity data (Peschler et al., 2004) was conducted along three profiles which transect the Houndé and Boromo greenstone belts. The 2½ D modeling approach (Popowski et al., 2009) allowed for variable geometry and density parameters in a ten kilometer wide polygon around the modeled profile as the original data were collected along curved roads.

The analyses of spectral properties of the lithological and regolith units of western Burkina Faso were conducted in-situ and in laboratory. The distribution of samples aimed at covering all of the present lithologies and weathering products. The soil samples were always taken at places where source rock could be determined by presence of a near outcrop. The spectra were acquired by ASD FieldSpec Pro FR

from 0.35 μm to 2.5 μm as hemispherical conical reflectance factors (Milton et al., 2009). A Labsphere spectralon panel was used as reference measure. Every sample was measured at three different places to account for the variations in the surface and mineralogical composition. The mineral constituents of the weathering crusts were analyzed by X-ray diffraction with an INEL CPS-120 diffractometer. The samples were acquired by scraping a 0.5 to 1.0 mm layer from the weathered surface with an electric drill. Qualitative analyses of phases were conducted based on the positions and intensity of the diffraction peaks. The spectral data were corrected for the drift between VNIR and SWIR1 detector using the addition method. The spectra were afterwards treated by the Savitzky-Golay filter (Savitzky and Golay, 1964). Both smoothed spectra and raw spectra form the spectral library. The analyses of the spectra included inspection of continuum removed spectral curves (Clark and Roush, 1984) and spectral feature fitting using the USGS spectral library (Clark et al., 2007), and the ASTER 2.0 spectral library (Baldrige et al., 2009).

The preparations of the data layers before automatic classifications related to regolith landform mapping included several procedures. All of the data were resampled were appropriate to 30 m spatial resolution. The Landsat data were used as base layer to which all data were registered. The visible and infrared bands of Landsat and ASTER were calibrated to reflectance utilizing the ATCOR software and field measurements (Richter, 1997). The thermal bands from ASTER were calibrated to emissivity using the TES algorithm (Gillespie et al., 1996). The polarimetric data from Radarsat-2 and ALOS PALSAR were transformed according to Pauli decomposition (Cloude et Pottier, 1996). The three resulting bands were geometrically corrected with the SAR simulation terrain correction algorithm (Schreier, 1993). The SRTM digital elevation model was reinterpolated using the method of Hutchinson (1989). The interpolated model was used to derive variables describing morphometric properties including slope, slope roughness, curvature (Zeverbergen and Thorne, 1987), relative relief, and hypsometric integral (Pike and Wilson, 1971) in a 3x3 pixel window. Hydrologic network was derived in order to create a layer of distances to main stream network and height of terrain above closest stream. The data from airborne gamma ray spectrometry were interpolated using the minimum curvature technique (Briggs, 1974). Ratios of e_{Th}/K and e_{U}/K were computed. A neural network classification (An et al., 1995; Leverington, 2011) was compared with maximum likelihood classification (Campbell, 1996) during the regolith landform map creation. The networks were set up for each class separately and then resulting probability images were combined so that highest probability was assigned to each respective class. Four classification scenarios were evaluated with increasing amount of input layers (11, 14, 20, 24). An accuracy assessment was conducted using the confusion matrix approach (Congalton and Green, 2009).

4. Results and discussion

The integrated approach aided in the discovery of structures, which were previously unrecognized in western Burkina Faso. The magnetic data served in mapping the structures and lithological units at depth, while gamma ray spectrometry data and remote sensing data permitted us to investigate the surficial features including the distribution of the regolith units. We have shown that the granitoid domains constitute four different types of intrusions (ME1-ME4), which is well visible in the magnetic data. The four different types of intrusions correspond to the types found in the field: tonalites-trondhjemites-granodiorites rich in Na (ME1), granodiorites and granites rich in Na (ME2), granites rich in K (ME3), gabbros (ME4). The lithological units of the greenstone belts, including gabbros, basalts, andesites and volcano-sedimentary rocks, were delimited based on interpretation of magnetometry and gamma ray spectrometry. The low susceptible Tarkwaian type sediments were discernible in zones where magnetically contrasting lithologies lie adjacent. At places the penetrative foliation S1 can be distinguished from S2 shear dominated fabric both in the field and in the magnetic data. Relict F1 folds were recognized at regional scale in the Houndé and Boromo belts. These folds may be found at outcrop scale in all of the three belts. Numerous regional-scale D2 shear zones were newly described Boromo-Poura, West Batié, Boni, Ouango-Fitini, Bossié, Greenville-Ferkessedougou-Bobo Dioulasso. The D2 structures represent prospective targets for gold exploration. Data acquired by airborne magnetometry prove very effective in mapping the Paleoproterozoic rocks up to depths of first hundreds of meters. Gamma ray spectrometry and remote sensing data are less effective. The gamma ray spectrometry data combined with digital elevation model data may rather be applied to mapping regolith landform units.

The chemical composition of the volcanic rock suites, which comprises tholeiitic basalts and voluminous series of intermediate calco-alkaline volcanics, suggests its compatibility with an environment of volcanic island arcs (2200–1700 Ma). The first intrusions of tonalites-trondhjemites-granodiorites (2190–2170 Ma) are most probably bound to the subduction of oceanic crust (Martin, 1994; Martin et al., 2005) or lower mafic crust. Correlation were established between the east flank of the Houndé belt and the west flank of the Boromo belt based on the structural, stratigraphic and geochemical relationships between the studied lithologies including the particular megacrystic basalts. The two belts, two synclinal structures, are connected by a presumed crustal scale antiform, which is obliterated by granitic intrusions. The folding of the belt lithologies started during the first phase of deformation D1 (~2160–2120 Ma) and was accompanied by abundant syntectonic granitoid intrusions, which bear subvertical magmatic foliation with steeply dipping lineations. The D1 deformation corresponds to an E-W pure shear dominated compression. The volcanic and volcano-sedimentary series of the Houndé belt are crosscut by a regional-scale Boni shear zone; a structure which controlled the deposition of the Tarkwaian-type and Birimian sediments (~2160–2120 Ma). The second phase of deformation is characterized by frequent shear zones and high strain

zones from local scale to regional scale, which affect in heterogeneous manner the preexisting structures. The character of this deformation corresponds to a simple shear dominated transpression. Granitoid intrusions have played an important role during the first two deformation phases of the Eburnean orogeny. The effect included mainly volume increase in the first stages of the orogeny and further by accommodation of the lateral coaxial shortening of the stiffer volcanic rocks of the greenstone belts. The volcanic rocks have progressively formed a crustal scale fold reaching length of 400 km from N to S. The compression and folding has been at a regional scale supported by a constant addition of granitic magma. The last deformation phase D3 is either late Eburnean or even Panafrican. The deformation corresponds to a N-S compression which is responsible for the development of subvertical E-W oriented subvertical crenulation cleavage and N-S shallow dipping reverse faults.

The visible and infrared parameters of the lithologies are correlated with the relative content of SiO₂ and the content of mafic minerals. Diagnostic absorption bands show similar features for the group of gabbros, basalts, and andesites. The molecules of Fe-OH and Mg-OH in chlorites and amphibole are responsible for absorptions at around 2.32 μm and de 2.25 μm. The absorptions at 1.0 μm are associated with ferrous ions in chlorites, amphiboles and pyroxenes. The altered surfaces show elevated reflectance values and a steeper profile of the spectral curve. Additional absorption at 2.2 μm suggests the presence of clays in the weathered surfaces. Increased absorptions below 0.6 μm are connected with hematite and goethite. Samples belonging to the group of tonalites and granodiorites show similar spectral behavior as gabbros. A larger difference in the measured reflectance values may be attributed to presence of leucocrate and melanocrate bands of the foliated granitoids. The group of granites shows an increased absorption at 2.2 μm, which is probably tied to surface alteration. The altered surfaces are dominated by kaolinite/smectite absorptions at 2.2 μm and goethite, hematite absorptions below 1.0 μm. The volcano-sedimentary rocks are characterized by Al-OH absorption at 2.2 μm, of a generally symmetric form corresponding to the muscovite/illite mineral assemblage and an asymmetric form with a secondary absorption at 2.17 μm indicative of kaolinite/smectite. The altered surfaces are spectrally similar to the fresh rock surfaces. The Taoudeni basin sediments show similar absorptions tied to kaolinite. The red and yellowish coloring of the sandstones is tied to the content of goethite and hematite in the matrix of the sandstones which is well visible in the spectral data. All of the soil spectra show an absorption feature at 2.2 μm tied to clay content. Soils developing over basalts, gabbros and andesites show lower reflectance values, with less evident kaolinite/smectite absorptions. The general form of the soil's spectra corresponds to the altered surfaces of the lithologies. The Fe-rich materials of the regolithic units, including the duricrusts and lag nodules possess a particular spectral signature strongly affected by the prevailing mineralogical phases of goethite and hematite.

The best results were obtained for neural network classification based on 11 input layers constituting gamma ray spectrometry data and derivatives of the digital

elevation model. The overall accuracy of this classification attained 95.71% and kappa coefficient value of 0.94. The High/Middle glacia were well classified with respect to both commission and omission errors. The separability of the high/middle glacia is generally high thanks to their particular signature in gamma-ray spectrometry data (high values of eTh and Th/K). In the Residual relief class were classified all of the erosional ridges and inselbergs. The Alluvial sediments class was the most accurately classified most probably due to the layers derived from the digital elevation model. The class of Low glacia was classified with lowest accuracy. This category includes a mixture of surfaces with highly variable characteristics in both in the content of radioelements and the morphometry. An overall accuracy of 91.55% and kappa coefficient of 0.88 was achieved for the same 11 input layer scenario classified with the help of maximum likelihood method. The results of neural network classifications were in all of the tested scenarios better than the results obtained by maximum likelihood classification. In the framework of the neural network classifications no improvement was observed for results where more input layers were included. This may be ascribed to the disturbing effects of vegetation and cultural activity on both radar and visible and infrared remote sensing data. It has to be noted though that all of the results differ in overall accuracy by no more than 5% (91–96%) with the exception of classification which included gamma-ray spectrometry data, SRTM derived data and polarimetric radar data. Here the accuracy dropped to 88.78% and kappa coefficient of 0.84.

5. Conclusions

This thesis focuses on enhancing our understanding of geological evolution and regolith distribution, using geophysical and remote sensing methodologies in western Burkina Faso. The area of geological investigations encompassed three greenstone belts, the Houndé, Boromo, Banfora and associated granitoid domains. The study involved the acquisition of new geological, petrophysical and in particular spectral property databases; finally, the regolith of part of the Boromo belt was investigated using an automatic regolith landform mapping system.

A new litho-structural map was created for the area of western Burkina Faso using an integrated approach where airborne geophysical, remote sensing data and field observations were analyzed conjointly. The lithological units of the greenstone belts were well described even under thick regolithic cover. Four generations of intrusions (ME1-ME4) were distinguished in the granitoid domains, which has important impact on the proposed geodynamic scenario. Numerous regional-scale shear zones were described. The analysis of an integrated multi source dataset shows strong potential in the process of mapping different regions of the West African Craton which may be either inaccessible or covered by thick regolithic or dense vegetation cover.

The study of greenstone rock assemblages and associated granitoids confirmed the presence of three principal compressional deformation phases which contributed to the formation of continental crust during the Eburnean orogeny. The

petrologic, structural, geochemical and metamorphic arguments suggest the existence of one or more volcanic arcs which entered a collision scenario. Plate tectonics must have operated already during this epoch, even though the mechanisms of crustal buildup might have differed from the present-day collisions. A crustal built-up formed by regional-scale folding of the mafic units is the preferred scenario, however, an influence of the granitoid intrusions must be pointed out as well.

In order to improve interpretations based on multispectral and hyperspectral remote sensing data, a new spectral library, containing over 700 spectra of rock and regolith surfaces with complementary spectra of vegetation, was created. The spectral coverage (0.35 μm to 2.5 μm) allows for direct comparisons with data from satellite platforms such as ASTER and Landsat. The sampled surfaces show the effect of typical superficial alteration of semi-arid regions. The formation of iron-rich crusts is controlled by lithological, textural and structural properties of the lithologies. The variation in the spectral signatures should allow for discriminations based on the analyses of hyperspectral data. The library constitutes essential information for analyses of remote sensing data in West Africa.

An automatic classification of regolith landform units was presented. Four main units – High/Middle glaciais, Residual relief, Alluvial sediments and Low glaciais were mapped. The best results were obtained for a neural network classification of eleven input layers, which included gamma ray spectrometry data and morphometric variables derived from the SRTM elevation model. The addition of other input data does not significantly affect the accuracy of the classification results. The neural network classification has supplied higher accuracies than the maximum likelihood classifier. The results improve the current results of geomorphological or pedo-geomorphological regolith landform mapping as they furnish higher spatial resolution and describe better the partitioning of the terrain especially for the classes of the Fe-rich duricrusts (High/Middle glaciais) and residual relief. The resulting classification map may be employed in guiding geochemical exploration or accessing tectono-geomorphic evolution of the area.

The research described in this thesis demonstrates the importance of integrating all available information sources during geological and regolith analyses conducted in ancient terrains in Africa. Geological studies conducted in these regions may profit from the large-scale view supplied by the methods and from the ability to penetrate regolith cover. In addition, the same methods provide sufficient data for characterization of the regolith landform units, which developed over the basement lithologies. With an increasing availability of new sources of data, which are currently being released, and will be released over the next decades, similar approaches may be used in other regions of West Africa and beyond.

Použitá literatura/References

- Albouy, Y., Boukeke, D., Legeley-Padovani, A., Villeneuve, J., Foy, R., Bonvalot, S., El Abbass, T., Poudjhom, Y., 1992. Données gravimétriques ORSTOM Afrique - Madagascar, Exploration Minière, Recherches d'Eau et Environnement, Ouagadougou, 1–14.
- An, P., Chung, C.F., Rencz, A.N., 1995. Digital lithology mapping from airborne geophysical and remote sensing data in the Melville Peninsula, Northern Canada, using a neural network approach. *Remote Sens. Environ.* 53, 76–84.
- Baldrige, A.M., Hook, S.J., Grove, C.I., Rivera, G., 2009. The ASTER spectral library version 2.0, *Remote Sens. of Environ.* 113, 711–715.
- Bessoles, B., 1977. Géologie de l’Afrique. Le craton Ouest-Africain, Mémoires BRGM, Paris, p. 88.
- Briggs, I.C., 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics* 39, 39–48.
- Burke, K., Gunnell, Y., 2008. The African Erosion Surface: A Continental-Scale Synthesis of Geomorphology, Tectonics, and Environmental Change over the Past 180 Million Years. *Geological Society of America Memoirs* 201, 1–66.
- Campbell, J. B., 1996, *Introduction to Remote Sensing*, 2nd ed., The Guilford Press, New York.
- Cawood, P.A., Kroener, A., Pisarevsky, S., 2006. Precambrian plate tectonics: Criteria and evidence. *GSA Today* 16, 4–11.
- Clark, R.N., Roush, T.L., 1984. Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications. *J. of Geophys. Res.* 89, 6329–6340.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R., Sutley, S.J., 2007. USGS Digital Spectral Library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, U.S. Geological Survey, Denver, Available online at <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06> (accessed on: 5/2010).
- Cloude, S.R., Pottier, E., 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 34, 498–518.
- Cloutis, E. A., 1992. Weathered and unweathered surface spectra of rocks from cold deserts: identification of weathering processes and remote sensing implications. *Geol. Fören. Stockholm Förhandl.* 114, 181–191.
- Condie, K.C., 1998. Episodic continental growth and supercontinents; a mantle avalanche connection? *Earth Planet. Sci. Lett.* 163, 97–108.
- Condie, K.C., Pease, V., 2008. When did plate tectonics begin on planet Earth? *Geological Society of America (GSA)*, Boulder.
- Congalton, R.G., Green, K., 2009. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. 2nd ed. Taylor and Francis, Boca Raton.
- Craig, M.A., Wilford, J.R., Tapley, I.J., 1999. Regolith-landform mapping in the Gawler Craton – an alternative approach. *MESA Journal* 12, 17–21.
- Craig, M.A., 2001. Regolith mapping for geochemical exploration in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 1, 383–390.

- de Wit, M.J., Ashwal, L.D., 1997. *Greenstone Belts*. Oxford University Press, Oxford.
- Dehaan, R.L., Taylor, G.R., 2004. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced salinization. *Remote Sens. Environ.* 80, 406–417.
- Direen, N.G., Cadd, A.G., Lyons, P., Teasdale, J.P., 2005. Architecture of Proterozoic shear zones in the Christie Domain, western Gawler Craton, Australia: Geophysical appraisal of a poorly exposed orogenic terrane. *Precambrian Res.* 142, 28–44.
- Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothern, J.S., Hook, S. & Kahle, A.B., 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 36, 1113–1126.
- Henquin, B., Totté, M., 1993. Le traitement d'un modèle numérique de terrain pour la caractérisation du milieu physique: Cas d'étude dans le sud-ouest du Burkina Faso. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* 28, 55–65.
- Hovgaard, J., Grasty, R.L., 1997. Reducing statistical noise in airborne gamma ray data through spectral component analysis, in: Gubins, A.G. (Ed.), *Proceedings Of Exploration 97: Fourth Decennial Conference On Mineral Exploration*. Prospectors and Developers Association of Canada, Toronto, 753–764.
- Chardon, D., Chevillotte, V., Beauvais, A., Grandin, G., Boulangé, B., 2006. Planation, bauxites and epeirogeny: One or two paleosurfaces on the West African margin? *Geomorphology* 82, 273–282.
- ICRAF-ISRIC, 2010. A Globally Distributed Soil Spectral Library: Visible Near Infrared Diffuse Reflectance Spectra, World Agroforestry Centre (ICRAF) and ISRIC - World Soil Information, Available online at: <http://africasoils.net/data/ICRAF-ISRICspectra> (accessed 01/2011).
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.* 8, 523–548.
- Janoušek, V., Farrow, C.M., Erban, V., 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *J. Petrol.* 47, 1255–1259
- Jaques, A.L., Wellman, P., Whitaker, A., Wyborn, D., 1997. High-resolution geophysics in modern geological mapping. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17, 159–173.
- Boher, M., Abouchami, W., Michard, A., Albarède, F., Arndt, N.T., 1992. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. *J. Geophys. Res. B Solid Earth and Planets* 97, 345–369.
- Lavaud, T., Beziat, D., Blot, A., Debat, P., Lompo, Martin, F., Ouangrawa, M., Tollon, F., 2004. Paleo-gossans within the lateritic iron crust: example of the nickeliferous prospect of Bonga, Burkina Faso. *J. Afr. Earth Sci.* 39, 465–471.

- Leverington, D.W., 2010. Discrimination of sedimentary lithologies using Hyperion and Landsat Thematic Mapper data: a case study at Melville Island, Canadian High Arctic. *Int. J. Remote Sens.* 31, 233–260.
- Li, X., 2008. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. *The Leading Edge* 27, 990–1002.
- Martelet, G., Truffert, C., Tourliere, B., Ledru, P., Perrin, J., 2006. Classifying airborne radiometry data with Agglomerative Hierarchical Clustering: A tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana). *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 8, 208–223.
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* 120, 223–253.
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews* 37, 215–224.
- Milligan, P.R., Gunn, P.J., 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17, 63–75.
- Milton, E.J., M. E. Schaepman, K. Anderson, M. Kneubuhler, N. Fox (2009), Progress in field spectroscopy, *Remote Sens. Environ.*, 113, 92–109.
- Pain, C., Chan, R., Craig, M., Gibson, D., Ursem, P., Wilford, J., 2007. RTMAP regolith database field book and users guide (second edition): CRC LEME Report 138, Perth.
- Peschler, A.P., Benn, K., Roest, W.R., 2004. Insights on Archean continental geodynamics from gravity modelling of granite-greenstone terranes. *J. Geodyn.* 38, 185–207.
- Pike, R. J., Wilson, S.E., 1971. Elevation–relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 1079–1084.
- Pons, J., Barbey, P., Dupuis, D., Leger, J.M., 1995. Mechanisms of pluton emplacement and structural evolution of a 2.1 Ga juvenile continental crust: the Birimian of southwestern Niger. *Precambrian Res.* 70, 281–301.
- Popowski, T., Connard, G., French, R., 2009. GMSYS Profile Modeling: Gravity & Magnetic Modeling Software for Oasis montaj - USER GUIDE v 4.1. Geosoft Inc., Toronto.
- Richter, R., 1997. On the in-flight absolute calibration of high spatial resolution spaceborne sensors using small ground targets. *Int. J. Remote Sens.* 18, 2827–2883.
- Rivard, B., Arvidson, R.E., Duncan, I.J., Sultan, M., El Kaliouby, B., 1992. Varnish, sediment, and rock controls on spectral reflectance outcrops in arid regions. *Geology*, 20, 295–298.
- Rowan, L.C., Simpson, C.J., Mars, J.C., 2004. Hyperspectral analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Mordor, NT, Australia. *Remote Sens. Environ.* 91, 419–431.
- Saadat, H., Bonnell, R., Sharifi, F., Mehuys, G., Namdar, M., Ale-Ebrahim, S., 2008. Landform classification from a digital elevation model and satellite imagery. *Geomorphology* 100, 453–463.

- Savitzky, A., Golay, M.J.E., 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal. Chem.* 36, 1627–1639.
- Schetselaar, E.M., Harris, J.R., Lynds, T., de Kemp, E.A., 2007. Remote predictive mapping (RPM): A strategy for geological mapping of Canada's north. *Geosci. Can.* 34, 93–111.
- Schreier G., 1993. SAR geocoding: data and systems, Wichmann-Verlag, Karlsruhe.
- Tapley, I.J., 2002. Radar Imaging, in: Papp, É. (Ed.), *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*. CRCLEME Open File Report 144, pp. 22–32.
- Taylor, G., Eggleton, R.A., 2001. *Regolith geology and geomorphology*. Wiley, Chichester.
- Teruiya, R.K., Paradella, W.R., Dos Santos, A.R., Dall'Agnol, R., Veneziani, P., 2008. Integrating airborne SAR, Landsat TM and airborne geophysics data for improving geological mapping in the Amazon region: the Cigano Granite, Carajas Province, Brazil. *Int. J. Remote Sens.* 29, 3957–3974.
- Vidal, M., Gumiaux, C., Cagnard, F., Pouclet, A., Ouattara, G., Pichon, M., 2009. Evolution of a Paleoproterozoic “weak type” orogeny in the West African Craton (Ivory Coast). *Tectonophysics* 477, 145–159.
- Wilford, J.R., Bierwirth, P.N., Craig, M.A., 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17, 201–216.
- Wilford, J.R., Murphy, B., Summerell, G., 2007. Delineating regolith materials using multi-scaled terrain attributes and gamma-ray imagery – applications for updating soil-landscape maps and managing dryland salinity, in: Oxley, L. and Kulasiri, D. (Eds.) *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2007, pp. 74–80.
- Windley, B., 1992. Proterozoic collisional and accretionary orogens, in: Condie, K.C. (Ed.), *Proterozoic Crustal Evolution*. Elsevier, Amsterdam, pp. 419–446.
- Woolrych, A., Batty, S., 2007. A Semi automated technique to Regolith-landform mapping in West Africa. *ASEG Extended Abstracts 2007*, Perth, 1–4.
- Wright, J.B., Hastings, D., Jones, W.B., Williams, H.R., 1985. *Geology and Mineral Resources of West Africa*. Allen and Unwin, London.
- Zeverbergen, L. W., Thorne, C.R., 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 12, 47–56.
- Hutchinson, M.F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *J. Hydrol.*, 106, 211–232.

Vaclav Metelka

Kubatova 10, Ceske Budejovice, 37004, Czech Republic
Work Phone: +420 257 089 438, Mob. Phone: +420 723 360 229
E-mail: v.metelka@gmail.com

PERSONAL INFORMATION

Date of Birth: May 25, 1979, Ceske Budejovice, Czech Republic

OBJECTIVE

To serve in sustainable development of the global community and to continue to widen my knowledge of geology and related science with respect to interdisciplinary techniques while gaining experience within international projects.

PERSONAL STATEMENT

Throughout my studies, I have always maintained an active approach towards interdisciplinary projects run by the Geology Department, taking part in research and fieldwork. For the past five years, I have become particularly involved in utilizing remote sensing data in geology related to geological risk management, environment and natural resource mapping. As a Masters student, I have been successfully cooperating with the Czech Geological Survey in mapping Mongolia, a development project financed by the Ministry of Environment and Ministry of foreign affairs. Currently, I am a part-time research officer at the same institution developing remote sensing and GIS applications for projects in Costa Rica and Czech Republic, while endeavoring a doctorate degree within the domain of geology, which forms a part of the West African Exploration Initiative project. A reliable team player and a keen organizer, I am enthusiastic and creative, determined to pursue interdisciplinary projects, able to analyze complex datasets while synthesizing ideas into publishable manuscripts and reports.

SELECTED SKILLS AND ACCOMPLISHMENTS

- Over six months of fieldwork experience in Costa Rica and Burkina Faso, including conference organizations
- Student GIS project III (Czech Republic) – judged second best research project out of the MSc. and Ph.D. students pool
- Good writer with publications including one peer-reviewed article, excellent knowledge of English and German
- One year student exchange stay in Appleton, Wisconsin, Xavier High School; Outstanding Art Award (1997-1998)
- One year student exchange stay in Burghausen, Germany (1993-1994)

QUALIFICATIONS

- Current* **PhD in Geology:** University of Toulouse III, Paul Sabatier (France)/Charles University in Prague (Czech Republic) – *Geophysical and remote sensing methodologies applied to the analysis of regolith and geology in Burkina Faso, West Africa*
- 1999-2005 **MSc in Geology/Geochemistry:** Charles University in Prague (Czech Republic) – *Geological Analysis of Remote Sensing Data in the Gobi Altai Region (written in English)*,
- 1997-1998 **High School Graduation Diploma:** Xavier High School, Appleton (Wisconsin, USA)

LANGUAGES

Czech (native tongue); English (professional level spoken and written), German (professional level spoken and written), French (intermediate level spoken, basic level written), Spanish (basic level spoken and written)

EMPLOYMENT HISTORY

- Current* **Research officer:** *Czech Geological Survey* – Part-time Employment: application of remote sensing and GIS in geology, participation on projects in Costa-Rica and Czech Republic
- 2006 –
2008 **Research officer:** *Czech Geological Survey* – Full-time Employment: application of remote sensing and GIS in geology (geological risks, natural resource mapping), administering remote sensing part of projects in Costa-Rica, Iran, Mongolia and Czech Republic
- 2005 –
2006 **Research Scientist:** *Hydrobiological Institute, The Academy of Sciences of the Czech Republic* – Part-time Employment: forest ecosystem monitoring with a focus on nutrient cycling and water quality

NON-GOVERNMENTAL ORGANIZATION AND VOLUNTEER EXPERIENCE

- 2007 **Organizer:** *West African Exploration Initiative workshop and conference in Ouagadougou, Burkina Faso*, duties included assisting with conference room management, registrations, and conference material preparations
- 2003 –
2005 **Research Assistant:** *Charles University in Prague and Czech Geological Survey*, *MSc. Thesis work:* Geological mapping of selected parts of Mongolia at the scale 1:50,000, remote sensing data analysis
- 2000 –
2003 **Research Assistant:** *Charles University in Prague* – Project: the discovery of the only occurrence of Silurian rocks in Moravia, Czech Republic – duties included assisting and conducting field work

- 2000 – **Research Assistant: Charles University in Prague** – Determining the radioactivity of natural spring waters in Karlovy Vary, Czech Republic – duties included assisting and conducting field work
- 2003
- 2000 **Lead Organizer: Global Outreach Programme Youth Camp** – organized international catholic youth camp in Czech Republic

SCHOLARSHIPS, GRANTS AND AWARDS

- 2008 **ATUPS** grant – awarded by the University of Toulouse III – student mobility financing
- 2007 **Co-tutelle Scholarship** – awarded by the French government (duration of three years); supplementary funding awarded by Universite Paul Sabatier
- 2005 **2nd Place Award:** Student GIS Project III, category of MSc. and PhD. thesis
- 2003 **Excellent Academic Achievement Scholarship (Charles University in Prague):** awarded by the Dean of the Faculty of Science

SPECIALIZED COMPUTER SKILLS & TECHNIQUES ASSETS

Word Processing, Presentation: Word, PowerPoint

Database and File Management: Access, Servant Salamander, Total Commander

Remote Sensing and GIS: ERDAS Imagine 9.3, ArcView 9.3, ENVI 4.8

Computer Languages: basics of IDL, Visual Basic, and R

WORKSHOPS AND TRAINING

- ESA Advanced training course on land remote sensing – 7 days, Prague (2009)
- WAXI training – 15 days – Advanced structural field mapping, Geological interpretation of regional geophysical datasets, 3D modeling, Ouagadougou (2007)
- WAXI workshop – 2 days, Ouagadougou (2007)
- ERDAS Imagine training – Advanced classification and Radar interpretation – 2 days, Prague (2006)

PERSONAL INTERESTS

Travel, Backpacking, Canoeing & Hiking: I have traveled most of Europe, and visited countries in North and Central America as well as Africa. I have hiked through the Alps and canoed some of the rivers in Czech Republic.

Painting, Art & Computers: Painting, and recently digital photography and video are one of my favorite free time activities.

Seznam publikací / Selected publications

Journals

- Metelka, V.**, Bartoux, L., Naba, S., Jessell, M. A geophysically constrained litho-structural analysis of the Eburnean greenstone belts and associated granitoid domains, western Burkina Faso, West Africa.-submitted to Precambrian research
- Bartoux, L., **Metelka, V.**, Naba, S., Jessell, M., Grégoire, M., Ganne, J. Juvenile Paleoproterozoic crust formation during the Eburnean orogeny (~2.2–2.0 Ga), western Burkina Faso, West Africa.-submitted to Precambrian research
- Purdon, M., Cienciala, E., **Metelka, V.**, Beranova, J., Hunova, I., Cerny, M. (2004): Regional variation in forest health under long-term air pollution mitigated by lithological conditions. *Forest Ecology and Management*, Vol. 195, Iss. 3, 355-371.

Conferences

- Metelka, V.**, Baratoux, L., Jessell, M., Barth, A., Naba, S. (2011): Regolith landform mapping in western Burkina Faso, using airborne geophysics and remote sensing data in a neural-network, 23rd Colloquium of African Geology, Johannesburg, 9-14 janvier.
- Baratoux, L., **Metelka, V.**, Naba, S., Grégoire, M., Jessell, M., Ganne, J. (2011) : From volcanic arcs to continental crust: tectonic evolution of western Burkina Faso during Eburnean orogenesis (~2.2-2.0 Ga). Proceedings of 23rd Colloquium of African Geology. Johannesburg, 9-14 janvier.
- Baratoux, L., Benoit, M., **Metelka, V.**, Baratoux, D., Naba, S., Grégoire, M., Jessell, M. (2011) :Paleoproterozoic plagioclase-megacrystic basalts: crystallization conditions and implications for water content in mantle source. Proceedings of 23rd Colloquium of African Geology. Johannesburg, 9-14 janvier.
- Metelka, V.**, Bartoux, L., Jessell, M., Naba, S. (2010): Regolith landform mapping based on remote sensing data and airborne geophysics in western Burkina Faso, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-6676, EGU General Assembly 2010.
- Metelka, V.**, Bartoux, L., Jessell, M., Naba, S. (2010): New geological and tectonic map of Paleoproterozoic basement in western Burkina Faso: integrated interpretation of airborne geophysical and field data, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-6759, EGU General Assembly 2010.
- Baratoux, L., **Metelka, V.**, Naba, S., Grégoire, M., Jessell, M.W., Ganne, J. (2010) : Tectonic evolution of Boromo and Houndé belts (western Burkina Faso) : contemporaneous crustal scale folding of volcano-sedimentary sequences and granitoid plutons emplacement (~2.2 – 2.0 Ga). Proceedings of the 23rd RST meeting, Bordeaux, 25-29 octobre
- Bartoux, L., **Metelka, V.**, Naba, S., Jessell, M., Grégoire, M., Ganne, J. (2010): Tectonic evolution of Boromo and Houndé belts (western Burkina Faso): contemporaneous crustal scale folding of volcano-sedimentary sequences and

granitoid plutons emplacement (~2.2 - 2.0 Ga), Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-6655-2, EGU General Assembly 2010.

Metelka, V., Baratoux, L., Jessell, M., Ganne, J., Naba, S. (2009): The use of Multispectral Imagery and Airborne Geophysics in Mapping Geology of western Burkina Faso, The 20th Annual Meeting of the Geological Remote Sensing Group (GRSG): Exploration Remote Sensing, 15-17 December 2009, London, United Kingdom.

Metelka, V., Baratoux, L., Jessell, M. (2009): Utilization of ASTER and Landsat 7 ETM+ sensors in mapping geologic and regolith units in western Burkina, In Kohut, M, Simon, L.: Geological congress of the Czech and Slovak geological society, Conference proceedings. State Geological Institute of Dionyz Stur. Bratislava.

Baratoux, L., **Metelka, V.**, Jessell, M., Naba, S., Ganne, J., Chardon, D. (2009): Geotectonic significance of syn-tectonic pluton emplacement in Palaeoproterozoic granite – greenstone belts of Boromo-Houndé belts, Burkina Faso (2.0-2.2 Ga). Proceedings of the Deformation Mechanisms, Rheology, and Tectonics, Liverpool