GEOGRAFIE – SBORNÍK ČESKÉ GEOGRAFICKÉ SPOLEČNOSTI
ROK 1997 • ČÍSLO 1 • ROČNÍK 102

JAROMÍR KOLEJKA, JÁSIM K. SHALLAL

IDENTIFIKACE A DVOJSTUPŇOVÁ KLASIFIKACE EROZNÍHO POŠKOZENÍ NA BÁZI ANALÝZY PŮDNÍCH VZORKŮ A DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ

J. Kolejka, J. K. Shallal: *Detection and Two-Step Classification of Erosional Damages with Help of Soil Sample Analysis and Satellite Images.* – Geografie-Sborník ČGS, 102, 1, pp. 17 – 30 (1997). – Surface soil data have been processed using the unsupervised classification (cluster analysis). Three soil categories with different erosional characteristics have been detected: heavily, moderately and slightly/no damaged soils. The supervised satellite image classification (MLC) was based on the data taken from case study areas in the proximity of classified soil sample sites on the vegetation free-fields.
KEY WORDS: soil erosion – sample clustering – image classification.

Autoři vyslovují poděkování MŠMTV ČR za poskytnutí finanční podpory návaznému projektu formou grantu pod č. ES025/1996 v rámci programu KONTAKT.

1. Úvod

Půdní eroze je přirozený proces, často však výrazně akcelerovaný neuváženou lidskou činností. V podmínkách České republiky je snad plošně nejrozšířenějším fenoménem negativního antropogenního působení na životní prostředí. Jeho význam je plně srovnatelný s degradací lesních porostů fytotoxickými imisemi a se znečištěním vod. Zatím nelze s jistotou odhadnout, jaký bude další vývoj tohoto jevu v souvislosti se sociálními a ekonomickými změnami ve státě, především po restituci a privatizaci zemědělského půdního fondu. Pravděpodobně nás čeká do jisté míry podobná tendence, jaká je známa ze západní Evropy. Tam na jedné straně dochází k intenzifikaci zemědělského využití nejkvalitnějších ploch, zatímco na druhé straně je patrná snaha po oslabení antropického vlivu na méně vhodné plochy pro zemědělství. K tomuto rozhodnutí se dostávají jak jednotliví vlastníci pozemků, tak administrativa na různých úrovních řízení. Z obecného hlediska ochrany půdního fondu jde o příznivý proces (jeho sociální dopady jsou však zatím nedoceněny) a již dnes je i u nás zapotřebí vytipovávat plochy přednostně určené pro snížení intenzity využívání, např. zavedením mnoholetých kultur, zatravněním, zalesněním, případně biostabilizací pro účely vodohospodářské, rekreační a přírodoochranné (včetně tzv. územních systémů ekologické stability krajiny). Ačkoliv jednotlivý vlastník pozemku má zpravidla představu o míře erozního poškození půdy, zcela chybí ucelená představa o stavu v širším prostoru, byť i v rámci jednotlivých obcí nebo i větších zemědělských závodů. Pro účely poznání lokální situace postačují informace získané například analýzou leteckých snímků, přičemž o pozemním způsobu zjišťování takové informace dnes již nelze pro jeho naprostou neefektivnost a nepřesnost reálně uvažovat. Regionální průzkum stavu erozního poškození půd se nevyhne použití družicové

informace. Jen takto si lze učinit přehled o tom, jaká opatření zvolit a kam je lokalizovat v určitém regionu. Tím může být již i typická část dnešních okresů, tedy území o rozloze několika desítek až stovek km^2. V takovém prostoru může místní, resp. okresní administrativa vhodně působit na vlastníky pozemků a informovat je o eventuálních ekologicky (a ve svém důsledku perspektivně i ekonomicky) kladných dopadech případné změny současného využívání půd.

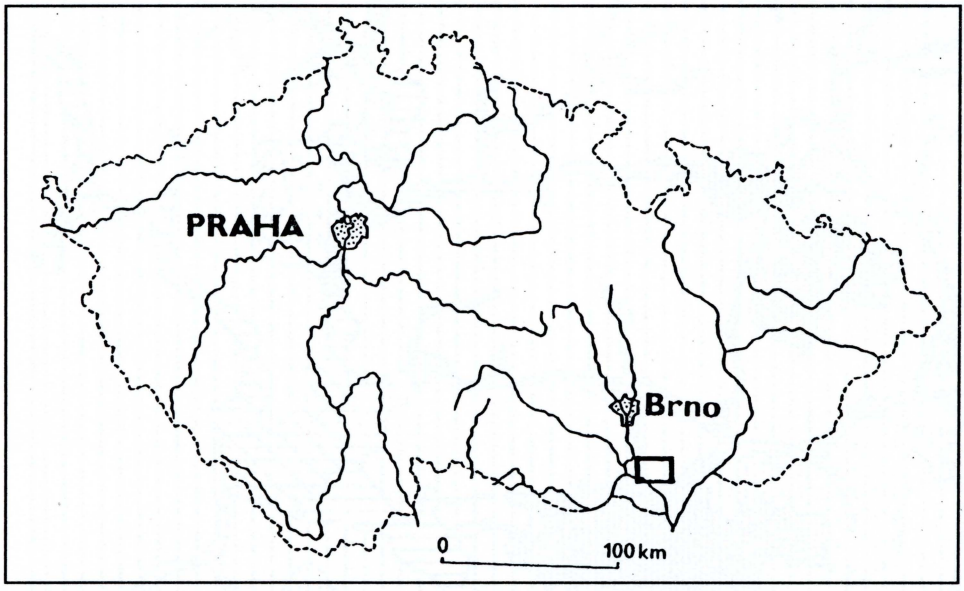
2. Pojem půdní eroze

Erozí se rozumí odnos půdy nebo jiného materiálu účinkem atakujícího média, kterým může být voda, vzduch, sníh, led, zemina atd. Pokud odnos probíhá rychle, může dojít k odkrytí matečné horniny a prostor ztratí především produkční funkci. Půda je sice obnovitelný přírodní zdroj, ale časová dimenze obnovy se většinou vymyká míře lidského života a tak z hlediska jedné generace jde o ztrátu nenahraditelnou (FAO, UNEP, UNESCO 1979). Půdní erozi lze klasifikovat a hodnotit z mnoha aspektů (viz Zachar 1970, Holý 1978). Pro nejobecnější praktické účely postačuje rozlišení vodní a větrné eroze, jejích forem, a hodnocení erozních škod.

Vlastní vodní eroze jako proces sestává ze dvou dílčích pochodů: uvolnění půdních částic a transportu částic vodou (Wischmeier, Johnson, Cross 1971). Uskutečnění těchto pochodů závisí na řadě klimatických, topografických, biotických a půdních faktorů, např. na intenzitě srážek a odtoku, na expozici, sklonu a délce svahu, na ochranném účinku vegetace, na odolnosti půdy vůči erozi, atd.

K větrné erozi obvykle dochází při rychlostech vzdušného proudění nad 5 $m.s^{-1}$. Taková síla větru již postačuje k uvolnění a transportu půdní částice. Ve větrem unášeném prachu je 10krát vyšší koncentrace organické hmoty, 9krát více dusíku a 18krát více fosforu (FAO, UNESCO 1983) než v dotčené půdě a i obsah vápníku a solí rozpustných ve vodě je mnohonásobně vyšší (Shallal, Jásim 1987). Větrnou erozí jsou tedy postihovány zejména činitelé úrodnosti půdy. Vyváté částice v místě sedimentace, především ve vodních objektech, pak působí intenzivní znečištění. K větrné erozi dochází v územích, kde srážky jsou nízké, proměnlivé a nerovnoměrně rozložené v čase, při nesouvislém nebo chybějícím vegetačním krytu, za vysokého obsahu prachových a jílovitých částic v půdě, je-li struktura půdy narušena a terén je plochý a otevřený.

Jak vodní, tak větrná eroze působí v našich podmínkách rozsáhlé škody, jejichž skutečný teritoriální rozsah nemůže být efektivně zhodnocen pozemními metodami. Prostorový záběr je hlavní výhodou nasazení dálkového průzkumu Země (dále DPZ) ke studiu a praktickému mapování tohoto fenoménu. Až na výjimku okamžitého změření hodnot eroze po události, nebo inventarizace charakteristických stop, neumožňují jak pozemní metody, tak ani metoda dálkového průzkumu spolehlivé velkoplošné odlišení následků vodní eroze na jedné straně a větrné eroze na straně druhé. Výsledkem hodnocení a mapování erozních škod na půdách je tedy u nás obvykle stanovení stupně poškození bez ohledu na podíl obou hlavních erozních procesů. S použitím metod DPZ ke studiu eroze půdy jsou již k dispozici široké empirické i metodické zkušenosti u nás i v zahraničí, především co se týče jejího prostorového podchycení (Mulders 1987, Bocco, Valenzuela 1988, Dobrovolskij, Andronikov 1990, mj. práce O. Stehlíka). Značné rezervy však zůstávají v kvantifikaci



Obr. 1 – Lokalizace zájmového území

zjištěných údajů, tj. v determinaci jednotlivých areálů podle míry poškození na bázi konkrétních půdoznaleckých poznatků. Předkládaný příspěvek nabízí jednu z možností, jak konkrétní pozemní laboratorní půdní údaje vložit do digitálního vyhodnocení družicových snímků, právě za účelem detekce a kvantifikace areálů erozního poškození půd.

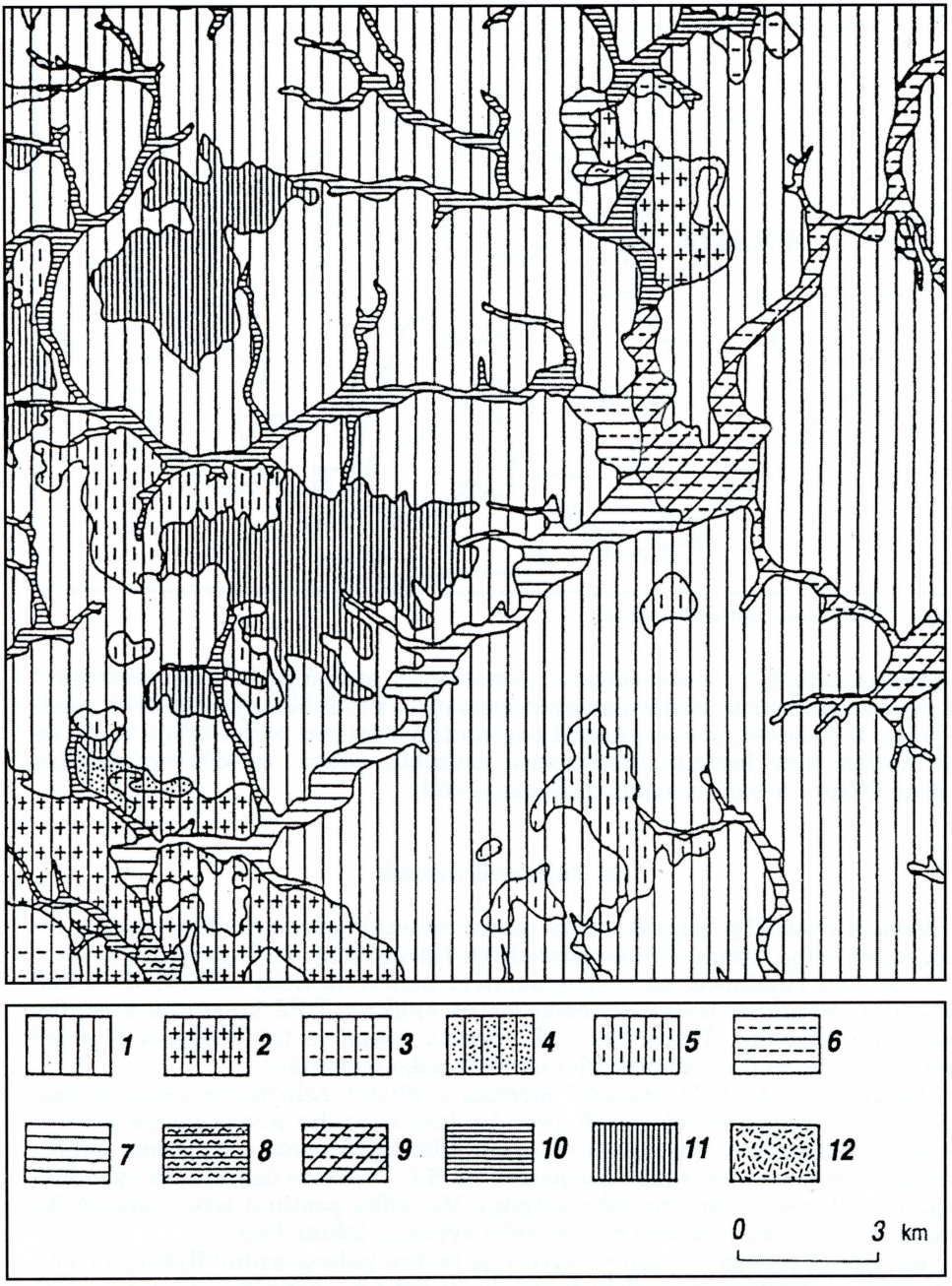
3. Zájmové území

Získané poznatky byly odvozeny zpracováním údajů z nevelkého, avšak reprezentativního území Středomoravských Karpat (obr. 1). V prostoru severovýchodně od Hustopečí na stejnojmenném mapovém listu měřítka 1:50 000 byla již v minulosti testována řada metod aplikace DPZ ke studiu erozního fenoménu (Kolejka, Petch 1991). K tomuto území je též k dispozici velké množství pozemního i distančního srovnávacího materiálu.

Mapový list 34-21 „Hustopeče" měřítka 1:50 000, zahrnuje rozmanité území od Pavlovských vrchů na JZ, přes širokou aluviální nivu Dyje po prostor bývalého Kobylského jezera na rozhraní Ždánického lesa a Kyjovské pahorkatiny ve Středomoravských Karpatech na SV. Celé toto území bylo vyhodnoceno na subscéně z družicového snímku. Výsledky postupu jsou v příspěvku demonstrovány na příkladu čtvercového výřezu z tohoto listu.

Geologický podklad území ve výřezu je tvořen paleogenními flyšovými souvrstvími, překrytými při východním okraji listu neogenními jíly a po celém teritoriu sprašemi, na úpatí vyšších svahů přecházejících do svahovin. Protékaná údolní dna pokrývají hlinito-písčité fluviální uloženiny. Suchá dna menších bočních údolí jsou vyplněna podobnými deluviofluviálními sedimenty (Stráník a kol. 1987).

Z geomorfologického hlediska náleží území ke geomorfologickým celkům Ždánický les a Kyjovská pahorkatina (pouze při východním okraji listu)



Obr. 2 – Půdní pokryv území ve výřezu z topografické mapy. Půdní areály: 1 – černozem modální, 2 – černozem karbonátová, 3 – černozem pelická, 4 – černozem arenická, 5 – černozem illimerizovaná, 6 – černice modální, 7 – černice karbonátová, 8 – černice oglejená karbonátová, 9 – černice solončakovaná, 10 – fluvisol karbonátový oglejený, 11 – hnědozem modální, 12 – kambizem modální.

v podsoustavě Středomoravských Karpat (Czudek a kol. 1976). Území dominuje geomorfologický podcelek Boleradická vrchovina (Demek a kol. 1978), což je plochá vrchovina na tektonicky porušených flyšových strukturách Západních karpat s intenzivními tangenciálními pohyby (Czudek a kol. 1973). Nejvyšším bodem výřezu je kóta Nedánov (368 m) severně od Boleradic. Minimální nadmořská výška je registrována jižně od Velkých Pavlovic v údolním dně Trkmanky (168 m).

Půdní pokryv území je relativně jednoduchý v důsledku poměrné homogenního půdotvorného substrátu a vcelku nevýznamných topoklimatických a vlhkostních rozdílů (obr. 2). Výrazně převládají černozemě v několika subtypech. Do větších nadmořských výšek přecházejí na obdobném substrátu v hnědozemě, na výchozech odolných pískovců výjimečně do kambizemí. Údolní dna kryjí fluvisoly a černice řady subtypů, místně s tendencí k zasolování (v oblasti bývalého Kobylského a Čejčského jezera). V drtivé většině jde o tmavé humózní půdy vyvinuté na světlém půdotvorném substrátě. Jakékoliv narušení humusového horizontu má zřetelné optické projevy, což je mimořádně výhodné právě z hlediska nasazení metod DPZ.

Klima regionu je teplé s roční průměrnou teplotou v údolních polohách kolem 9 °C. Roční úhrny srážek se pohybují kolem 600 mm s výrazným letním maximem. Povrchový odtok je silně rozkolísaný vzhledem k malé retenční schopnosti území (Vlček 1971). Maximum odtoku připadá na únor a březen během jarního tání sněhu, nízkého výparu a slabého zadržovacího účinku chybějícího nebo odpočívajícího vegetačního krytu. Účinkem teplých jarních srážek dochází k náhlému tání sněhu a k poškozování nechráněných půd odtékající vodou. Letní intenzivní srážky překonávají ochranný efekt nesouvislého vegetačního krytu některých kultur a znovu poškozují půdy. Maximum větrné eroze lze očekávat na počátku a na konci chladného pololetí za vpádů studených vzdušných hmot od SZ a teplých od JV.

Původní vegetační kryt elevací (převážně v dubovém a zčásti v bukodubovém vegetačním stupni) a údolních luhů je silně transformován člověkem v průběhu cca 5 000 let. Listnaté lesy, místy v přírodě blízkém druhovém složení, pokrývají vrcholy nejvyšších kót a sklonitější severní svahy. Drtivá většina ploch je intenzivně zemědělsky využívána, často bez ohledu na sklonitostní poměry. Hustá síť venkovských sídel je vesměs středověkého založení. V minulém století došlo k odvodnění mělkých jezerních pánví Kobylského a Čejčského jezera, postupně přeměněných nejprve v pastviny a pak v ornou půdu.

4. Sběr údajů a jeho předběžné zpracování

Použité terénní údaje byly průběžně sbírány v letech 1987 – 1992, počínaje termínem přeletu družice Landsat 5 dne 10. května 1987. Základní podpůrný terénní průzkum byl prováděn pracovníky Geografického ústavu ČSAV v Brně (nyní pobočka Ústavu geoniky AV ČR) v krátké suché periodě několika dnů po tomto datu. V jeho průběhu byly registrovány údaje o druhu a hustotě vegetačního krytu, jeho fenologické fázi vývoje, povrchové vlhkosti půdy. V letech 1991 – 1993 byly z vybraných klíčových ploch (bez vegetačního krytu v době přeletu družice) odebrány půdní vzorky za podobných povětrnostních podmínek jako v květnu 1987 a proveden terénní popis sledovaných půdních kategorií (předběžné kategorie intenzity erozního poškození, za různých terénních podmínek).

Půdní vzorky byly odebrány za bezsrážkové periody vždy v podobě tenké suché „skořepiny" z půdního povrchu, neboť pouze na její vlastnosti reagují snímací čidla distančního zařízení. Podle Munsellovy barevné stupnice byla registrována barva půdy v suchém stavu v době odběru a ihned v terénu byla část půdního vzorku nasycena vodou k odečtení barvy „za mokra" (barva za mokra byla registrována s předpokladem, že teoreticky odlišná vlhkost odebraných vzorků se tak dostane nasycením vodou na stejnou úroveň u všech). Dále byla v terénu ke každému vzorku zaznamenávána informace o terénních poměrech (sklon, expozice, procesy), o vizuálním hodnocení vlhkosti půdního povrchu, druhu a hustotě vegetace. V laboratorních podmínkách na katedře geologie a pedologie Lesnické fakulty Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně bylo pak zjišťováno mechanické složení půdy, vlhkost, pH ve výluhu, obsah chloridů, $CaCO_3$ a humusu, elektrická vodivost půdy. Získané informace byly vyneseny do tabulek a map s přesnou lokalizací.

Snímkový materiál byl představován digitálním záznamem zájmového území na plovoucí čtvrtscéně družice Landsat 5 ze dne 10. května 1987 ve všech sedmi snímaných pásmech spektra.

5. Metody zpracování údajů

5.1 Pracovní východiska

Pro hlubší pochopení zákonitostí vývoje a rozšíření eroze půdy jsou zapotřebí faktické informace o teritoriálním rozšíření jevu s kvantitativní a kvalitativní diferenciací od místa k místu. Co se týče prostorového aspektu půdní eroze, vhodnější metody, než které nabízí ke studiu DPZ, k dispozici dnes nejsou. Proto je nezbytné pokračovat v ověřování dalších postupů zpracování dat DPZ v našich podmínkách.

Brněnská geografie má tradiční dlouhodobé dobré zkušenosti s vývojem a využitím metod DPZ ke studiu eroze půdy. Řada pozitivních výsledků byla získána aplikací jednoduchých vizuálních nebo přístrojových postupů interpretace leteckých a družicových snímků. Současné digitální technologie umožňují vyhodnocovat distanční záznamy z rozsáhlých oblastí v krátkém čase. V zájmovém území bylo v rámci experimentu testováno několik metod interpretace materiálů družice Landsat za podpory pozemních informací. Předmětem hodnocení vhodnosti zpracovatelských postupů byly následující metody: tvorba a interpretace optimální nepravě barevné syntézy vizuálními a přístrojovými postupy, jednoduché vyhodnocení zvýrazněných záznamů, interpretace snímku předzpracovaného faktorovou analýzou, řízenou a neřízenou klasifikací. Žádná z těchto individuálních metod „per pixel" nedala podle výsledků testů uspokojivé výsledky. Značný pokrok však přineslo vícestupňové zpracování dat, založené na statistické analýze údajů z pozemních půdních vzorků a na zakomponování výsledků analýzy do digitálního vyhodnocení družicového záznamu s plošným pokryvem. S jistou opatrností byla takto získána standardizovaná informace o míře erozního poškození půd v zájmovém území, jak je demonstrováno na příkladu Středomoravských Karpat.

5.2 Shluková analýza půdních vzorků

Shluková analýza umožňuje vyhledat ve vícerozměrném datovém souboru skupiny údajů popisující vzájemně si do jisté míry podobné reálné objekty. Pro každou takovou skupinu lze pak zjistit a definovat její základní statistic-

ké parametry a jejich hodnoty. V n-rozměrném prostoru (*n* značí počet charakteristik každého objektu) si pak lze skupiny podobných objektů – typy – představit jako shluky bodů soustředěných kolem statisticky ideálního středu. Jeho vlastnosti a charakteristiky variability okolní množiny podobných objektů jsou pak parametry „typu".

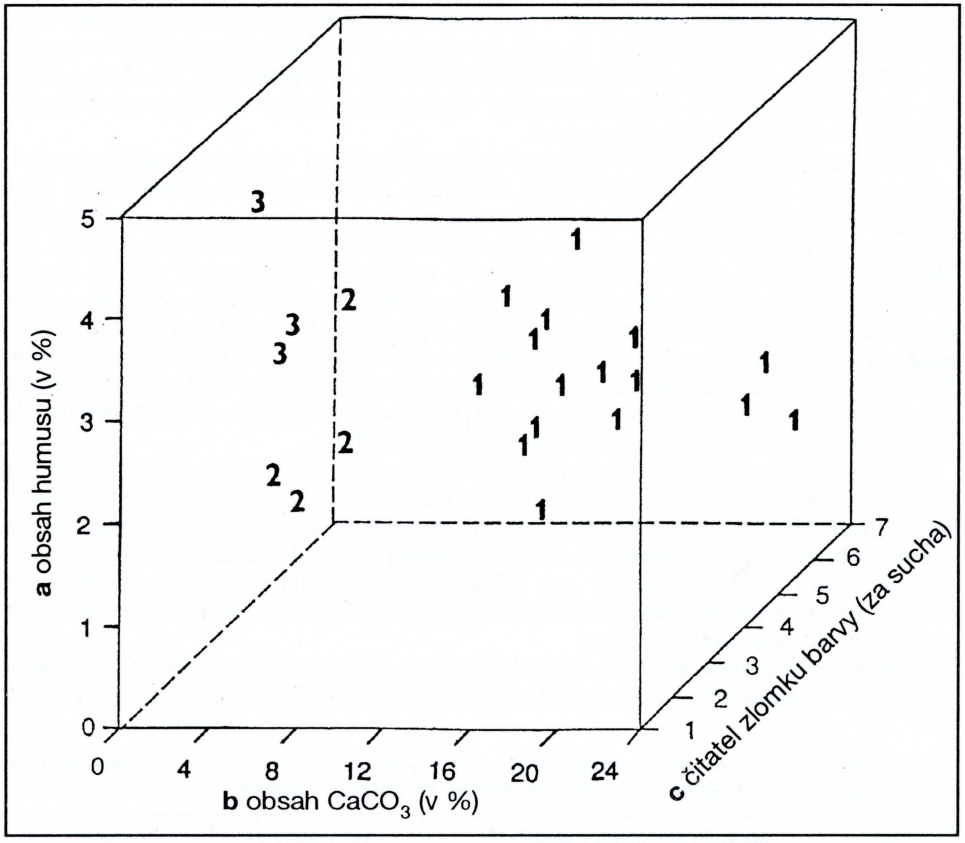
V zájmovém území byly odebrány celkem 23 půdní vzorky a podrobeny polnímu popisu a laboratorní analýze. Lokality sběru terénního materiálu byly vybírány předběžně podle optických projevů půdy na nepravě barevných syntézách a upřesňovány v terénu podle vizuálního hodnocení míry erozního poškození půdy. Ve všech případech šlo o relativně homogenní půdní areály (i co se týče technické úpravy povrchu) s rozměry podstatně většími, než je rozlišovací úroveň družicového záznamu. Ačkoliv nelze počítat s absolutní homogenitou půdního pokryvu v plochách s odběry vzorků, předpokládali jsme, že tato nejednotnost bude kompenzována generalizačním účinkem obrazového elementu družicového záznamu. Extrapolace informace z bodu odběru do plochy pixelu může být proto zatížena jistou chybou.

Ze získaného souboru analytických údajů pak byly postupně vylučovány ty, u kterých se nezjistily vizuální projevy signifikantně registrované distanční technologií. Naopak výrazné optické projevy půdy jsou logicky vázány na barvu (především „za sucha"), obsah humusu a obsah vápníku (tab. 1), podstatně méně na barvu půdy „za vlhka" a mechanické složení. Kombinace těchto údajů a variant kódu barvy půdy byly podrobeny shlukové analýze za využití několika metod třídění.

Shlukovací statistika byla realizována na počítači Olivetti M250 na Ústavu lesnické ekonomie a řízení Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity

Tab. 1 - Vybrané testované charakteristiky půd zájmového území Středomoravských Karpat pro analýzu družicového snímku k mapování erozního poškození

číslo vzorku	podíl frakce (zrno v mm) v %				barva půdy za		% obsah	
	< 0,01	0,01-0,05	0,05-0,1	0,1-2,0	sucha	vlhka	humusu	$CaCO_3$
1	23,38	21,54	24,16	30,92	5Y 7/2	5Y 5/3	0,86	19,5
2	43,44	36,74	14,52	5,30	2,5Y 6/3	2,5Y 3/2	2,84	12,3
3	32,44	49,90	16,02	1,64	2,5Y 7/3	10YR 5/3	1,04	15,0
4	34,82	44,58	18,06	2,54	2,5Y 7/3	2,5Y 4/3	1,38	14,9
5	35,46	46,98	15,22	2,34	2,5Y 5/3	2,5Y 3/2	1,93	16,5
6	25,24	46,52	25,42	2,82	2,5Y 7/2	2,5Y 4/3	0,65	13,4
7	30,38	43,48	23,46	2,68	10YR 4/2	5Y 3/1	2,48	5,0
8	37,60	32,92	19,14	10,34	2,5Y 4/1	10YR 2/1	3,54	4,0
9	25,14	37,08	19,00	18,78	10YR 6/3	2,5Y 4/3	1,23	11,2
10	35,84	23,80	17,88	22,48	2,5Y 7/3	2,5Y 5/3	1,21	20,2
11	34,90	38,06	21,60	5,44	2,5Y 6/3	2.5Y 4/3	1,76	10,5
12	33,30	45,20	17,80	3,70	2,5Y 7/3	2,5Y 5/4	0,79	22,0
13	30,10	37,64	21,04	11,22	5Y 6/2	5Y 4/4	1,71	13,0
14	24,10	52,38	22,10	1,42	10YR 6/3	2,5Y 4/4	0,68	11,0
15	27,40	38,90	27,58	6,12	2,5Y 6/3	10YR 4/3	1,35	11,6
16	27,64	42,72	24,28	5,36	2,5Y 6/2	10YR 3/3	1,85	11,0
17	32,14	41,94	17,24	8,68	2,5Y 6/2	10YR 5/3	1,43	8,2
18	51,88	20,40	8,36	19,36	10YR 2/2	10YR 1,7/1	2,83	5,0
19	41,64	33,24	13,98	11,14	2,5Y 6/3	10YR 3/2	2,07	9,4
20	39,74	35,70	16,70	7,86	2,5Y 3/3	10YR 2/2	3,45	5,4
21	29,50	38,40	21,92	9,08	10YR 3/2	10YR 2/2	2,28	4,5
22	56,72	25,16	10,50	7,62	2,5Y 4/2	2.5Y 3/2	4,07	1,1
23	57,72	25,14	9,68	7,46	2,5Y 3/3	10YR 2/2	3,33	4,5



Obr. 3 – Prostorové schéma klasifikace půdních vzorků podle míry erozního poškození (1 – silné poškození, 2 – střední poškození, 3 – bez zřetelného poškození). Výsledky shlukové analýzy půdních vzorků použitím „Average method"; a – obsah humusu (v %), b – obsah $CaCO_3$ (v %), c – čitatel zlomku barvy (za sucha).

Tab. 2 - Klasifikace odebraných půdních vzorků do skupin označených podle míry erozního poškození. Označení shluku: 1 - silná eroze, 2 - střední eroze, 3 - minimální eroze.

číslo vzorku	klasifikace	číslo vzorku	klasifikace
	číslo shluku		číslo shluku
1	1	13	1
2	1	14	1
3	1	15	1
4	1	16	1
5	1	17	1
6	1	18	3
7	2	19	1
8	2	20	2
9	1	21	2
10	1	22	3
11	1	23	3
12	1		

v Brně podle programu STATGRAPHICS. Ve výsledcích jednotlivých shlukovacích metod nebylo podstatnějších rozdílů, pokud byla použita informace o obsahu humusu, $CaCO_3$ v půdním vzorku a čitatel zlomku barevného kódu. V ostatních případech byl sice počet shluků opět nejčastěji roven třem, avšak byly i případy vyššího počtu vymezených skupin (4, 5). Vzorky byly obvykle rozděleny do tří skupin (tab. 2), popsaných jako: 1 – silně poškozené půdy, 2 – středně poškozené půdy, 3 – půdy v normálním stavu

(bez optických projevů erozního poškození). Uvedené skupiny půdy se podle míry erozního poškození výrazně vzájemně diferencují i v příslušném třírozměrném prostoru (obr. 3). Počet tří skupin se ukazuje jako nejvhodnější i proto, že tyto skupiny jsou vždy relativně výrazně odlišné (ve vzorcích, jak se později ukázalo i na snímcích), snadno definovatelné a zapamatovatelné. Zařazení vzorků do tříd bylo pak pečlivě vyneseno do mapy jako označení odběrových míst.

5.3 Metody vyhodnocení družicového snímku

Digitální snímek skaneru TM družice Landsat 5 představoval obsáhlou datovou matici o rozměrech 3470 x 3060 pixelů s rozlišovací schopností cca 30 m na zemském povrchu (cca 120 m v termálním pásmu spektra, 6. kanál TM). Zpracování těchto dat bylo provedeno v systému EASI/PACE instalovaném v laboratoři DPZ Ústavu krajinné ekologie AV ČR v Českých Budějovicích.

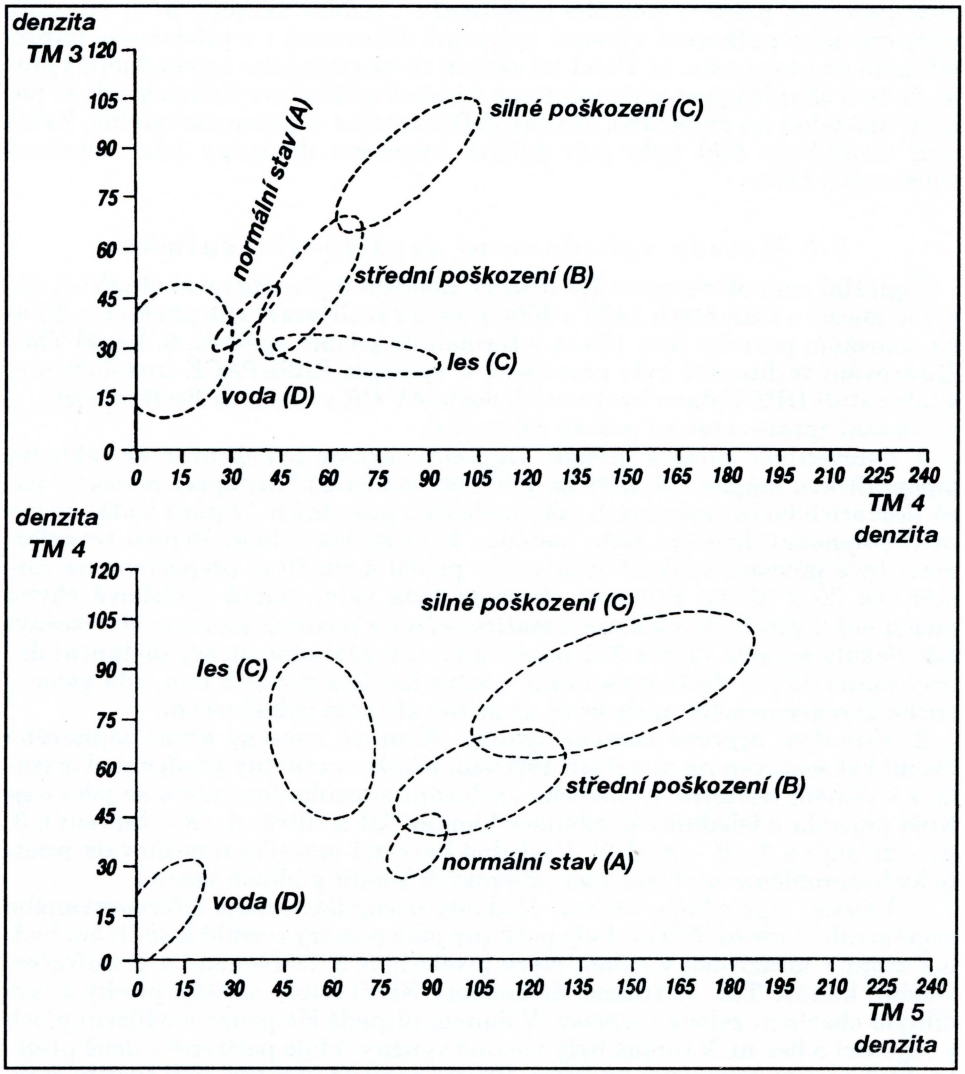
Vlastní zpracovatelský postup zahrnoval:

1. Geometrické korekce snímku. Digitální záznam byl slícován se základní topografickou mapou ČR měřítka 1:50 000, list 34-21 Hustopeče pomocí 7 párů lícovacích bodů (vybraných jako nejlepší z původních 12 párů bodů) za využití polynomu druhého řádu metodou kubické konvoluce. Během transformace byla původní velikost obrazového pixelu à cca 30 m přepočtena na rozměr cca 20 x 20 m. Přesnost slícování byla velmi dobrá (polohová chyba menší než 1 pixel). Nová datová matice (výřez z původní plovoucí čtvrtscény) tak získala rozměr 1216 x 952 pixelů a tvořila základní surový distanční datový materiál pro další zpracování, i když lze diskutovat o tom, zda geometrické korekce neměly následovat až po tematickém vyhodnocení.

2. Vytvoření nepravě barevné syntézy. Nepravě barevný obraz zájmového území byl sestaven na monitoru zařízení, jakožto nezbytný předpoklad orientace v daném teritoriu. Z hlediska sledování erozního fenoménu se jako nejlepší ukázala následující kombinace kanálů TM a filtrů: 5. (R – červený), 3. (G – zelený) a 1. (B – modrý). Výsledná barevná mozaika umožňovala prakticky bezproblémovou lokalizaci odběrových lokalit půdních vzorků.

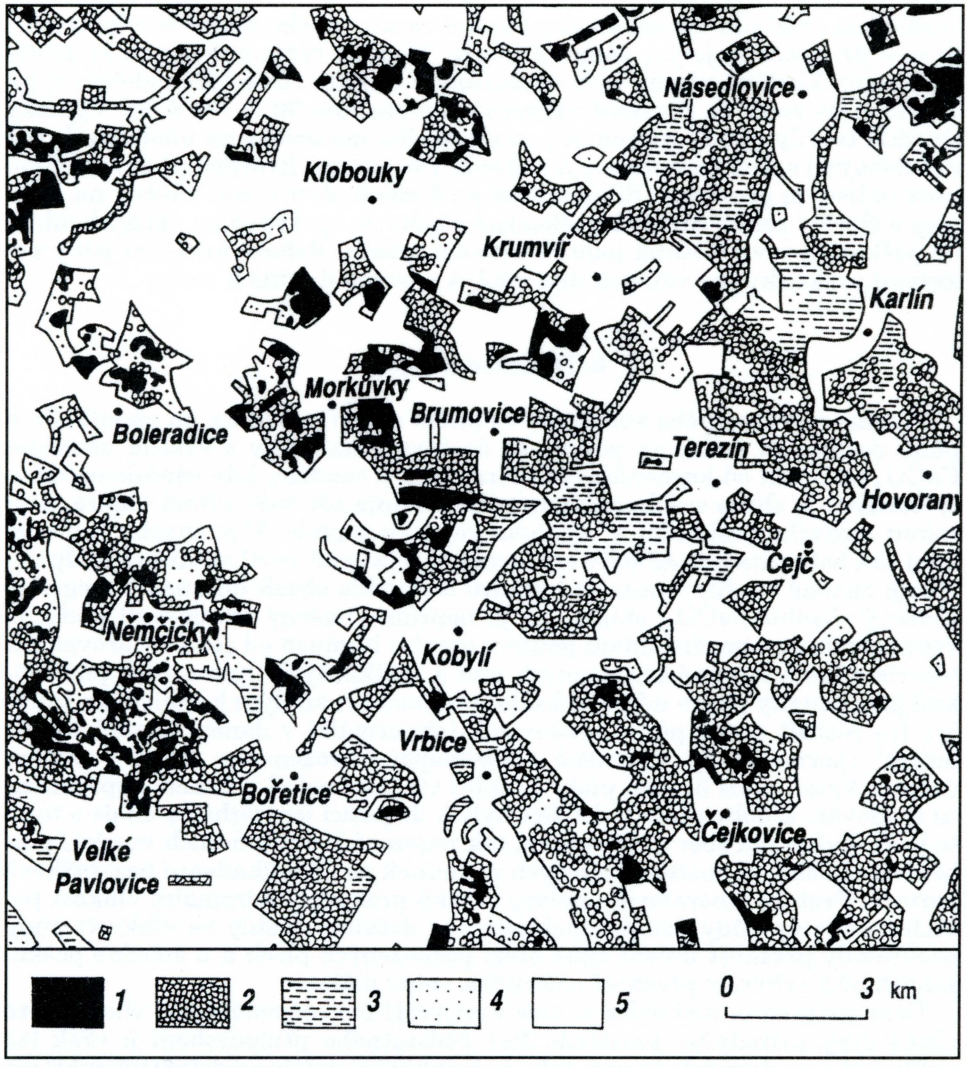
3. Výpočet vegetačního indexu. Hodnoty normalizovaného diferencovaného vegetačního indexu (NDVI) byly počítány jako poměry rozdílů k součtům hodnot stupně odrazivosti v jednotlivých pixelech ve 3. (červeném) a 4. (infračerveném) kanálu TM. Je známo, že hodnoty NDVI dobře odlišují plochy s rozdílným obsahem zelené biomasy. V daném případě šlo pouze o odlišení ploch s vegetací a bez ní, k čemuž byly vhodně využity údaje pořízené v době přeletu družice nad zájmovým územím. Plochy pokryté vegetací pak tvořily masku, překrývající půdy, a znemožňující tak sledování erozního poškození. To se pak mohlo výhodně soustředit na holé plochy.

4. Klasifikace holých ploch v obrazu. Všechny půdní vzorky byly odebrány z míst, které byly v době přeletu družice bez vegetace. Proto bylo možné vyhledat v maskovaném obraze všechny odběrové lokality, znaje rovněž míru místního erozního poškození odvozenou klasifikací půdních vzorků shlukovou analýzou. Kolem každého odběrového místa bylo v prostoru s obdobnými optickými projevy vymezeno tzv. tréninkové území, čili statisticky dostačující množina – vzorek pixelů daného typu. Pixely všech sledovaných typů (1 – silné erozní poškození, 2 – střední erozní poškození, 3 – normální stav půdy, a dále pak prostorově orientační kategorie: 4 – les, 5 – vodní plochy) byly podrobeny testu separability, čili posouzení míry vzájemného se překrývání jejich datových souborů dle hodnot stupňů odrazivosti v pixelech. Eliptické



Obr. 4 – Vzájemná odlišnost rozdílně erozí poškozených ploch podle skupin pixelů družicového snímku Landsat TM v kombinacích kanálů 3 a 4, 4 a 5. A – normální stav, B – střední poškození, C – silné poškození, D – les, E – voda.

křivky (obr. 4) vyznačují hlavní prostor výskytu pixelů daného typu ve dvojrozměrném prostoru, definovaném osami náležejícím porovnávaným kanálům TM. Velikost a tvar každého elipsoidu závisí na statistických hodnotách příslušné množiny typu objektů. Namátkově setavené dvojrozměrné diagramy pixelů (scatterplot-diagramy TM3 v. TM4, TM4 v. TM5) a statistické hodnocení k nim ukazují na velmi dobré odlišení zájmových tříd. To se týká jak obrazu, tak ve svém důsledku i rozboru půdních vzorků. Nakonec byly pomocí procedury CHNSEL definitivně vybrány kanály TM (1, 3, 4, 5, 7) vhodné pro nasazení klasifikační metody nejvyšší pravděpodobnosti („maximum likelihood classification" – MLC). Metodou MLC byly všechny zbylé pixely obrazu



Obr. 5 – Výsledek klasifikace družicového snímku metodou největší pravděpodobnosti ve výřezu pro část Středomoravských Karpat za využití statisticky vyhodnocených pozemních půdně analytických údajů. Areály: 1 – silně erozí poškozené půdy, 2 – středně erozí poškozené půdy, 3 – půdy bez zřetelného poškození, 4 – neklasifikované půdy, 5 – maskované plochy.

roztříděny do uvedených pěti kategorií a skupiny neklasifikovaných pixelů (cca 5 % ze zbytku). Tímto postupem byly poznatky získané laboratorní a terénní analýzou půdních vzorků extrapolovány standardně do prostoru daného mapového listu.

5. Interpretace a kontrola výsledků. Z výsledků bylo ještě zapotřebí eliminovat ostatní abiotické povrchy (zástavba, komunikace, manipulační plochy aj.). K tomuto účelu byla manuálně vytvořena další maska, překrývající právě takové areály. Zbylý obraz (po vypuštění již známých vodních a lesních

areálů) na příkladu výřezu ze standardně zpracovaného mapového listu (obr. 5) pak již znázorňuje jen zájmové plochy lišící se vzájemně mírou erozního poškození. Zjištěné plochy byly ověřovány v terénu, co se týče polohy i typu a bylo stanoveno, že přesnost zpracování přesahuje 90 % (91,4 %). Výjimky obvykle tvořily plochy akumulací erodovaného materiálu na údolních dnech s obdobnými optickými projevy a nakonec i se stejnou kvalitou půdy, vzniklou však odlišným procesem. Silně erozně poškozené plochy jsou vázány na sklonitý a členitý reliéf. Středně poškozené plochy se vyskytují na okrajích silného poškození a v ostatním pahorkatinném reliéfu. Bohaté humózní půdy pokrývají prakticky bez výjimek dna údolí a povrchy úpatních rovin.

6. Diskuze a závěr

Většina půdotvorného substrátu v daném území je bohatá na vápník. Je-li půda poškozena erozí, na povrch se dostávají materiály s vyšším obsahem $CaCO_3$ na rozdíl od karbonátových černozemí a rendzin, kde vápníkem bohatý horizont je shora srážkami vymýván. Existuje zde tedy přímá úměra mezi mírou erozního poškození a obsahem vápníku v půdě. Vliv obsahu humusu není tak jednoznačný. Ačkoliv erodované a relativně erozí netknuté půdy vykazují značné rozdíly v obsahu humusu a obvykle obsah humusu je nepřímo úměrný obsahu $CaCO_3$, stejně tak je nepřímo úměrný odrazivosti půdy, je velmi obtížné za použití údajů pouze o obsahu humusu od sebe separovat kategorie silně a středně erodovaných půd a „netknutých" humózních půd. Pokud jsou použity pouze údaje o obsahu humusu při analýze kosmického snímku, lze rozlišit pouze půdy „erodované" (abnormální v daném území) a „humózní" (normální, tj. víceméně odpovídající přirozenému stavu v daném území). Vztah mezi barvou půdy a půdní vlhkostí nebyl v daném experimentu studován. Z doby přeletu družice byly k dispozici jen verbální údaje o tomto jevu. Avšak jak sběr družicových, tak pozemních dat (půdních vzorků) proběhl za obdobných meteorologických podmínek po několikadenní bezsrážkové periodě. Protože laboratorní analýzy vzorků prokázaly minimální vlhkost povrchové vrstvy půdy, lze předpokládat, že detailní rozdíly ve vlhkosti půdy neovlivnily přesnost určení silně erozí poškozených ploch a u středně poškozených půd ovlivnily přesnost určení jen velmi málo.

Demonstrovaná metodika je sice s největší pravděpodobností vhodná pro různé typy přírodního prostředí. Bez podstatného přizpůsobení ji však lze aplikovat v podobných území, kde se kombinuje světlý půdotvorný substrát s tmavými humózními půdami (např. flyšové a sprašové krajiny, krajiny České křídové tabule a neogénních pánví). V dalších územích je zapotřebí nejprve empiricky ověřit a kvantifikovat vztahy mezi půdami s různou mírou poškození a jejich optickými projevy, a teprve pak přikročit ke zpracování distančních dat. V současné době (1996/1997) probíhá ověřování výsledků za využití obdobného družicového záznamu pro zcela stejné území pořízeného dne 1. 8. 1994, aby byla na jedné straně posouzena spolehlivost metody, a na druhé straně případně dynamické změny sledovaného erozního fenoménu v dané lokalitě. Metodický postup je dále rozvíjen o aplikaci integrovaných digitálních geoekologických dat.

Poděkování: Kromě MŠMTV ČR vyslovují autoři poděkování též panu RNDr. Jiřímu Žaloudíkovi, CSc. z Ústavu ekologie krajiny AV ČR v Českých Budějovicích za spolupráci při provedení řady zpracovatelských procedur.

Literatura:

BOCCO, C., VALENZUELA, C. R. (1988): Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. ITC Journal, č. 4, ITC, Enschede, s. 309-319.
CZUDEK, T. a kol. (1973): Typologické členění reliéfu ČSR. Mapa 1:500 000, GgÚ ČSAV, Brno.
CZUDEK, T. a kol. (1976): Regionální členění reliéfu ČSR. Mapa 1:500 000, GgÚ ČSAV, Brno.
DEMEK, J., a kol. (1978): Podrobné regionální členění reliéfu ČSR. Mapa 1:500 000. GgÚ ČSAV, Brno.
DOBROVOLSKIJ, G. V., ANDRONIKOV, V. L., eds. (1990): Aerokosmičeskije metody v počvovedenii i ich ispolzovanije v selskom chozjajstve. Nauka, Moskva, 247 s.
FAO, UNESCO (1983): Guidelines for the control of soil degradation. Rome, 38 s.
FAO, UNEP, UNESCO (1979): A provisional methodology for soil degradation assessment. Rome, 85 s.
HOLÝ, M. (1978): Protierozní ochrana. SNTL/Alfa, Praha, 283 s.
KOLEJKA, J., PETCH, J. (1991): Hodnocení zpracovatelských metod DPZ pro zjišťování eroze půdy na území Středomoravských Karpat. Zprávy GGÚ ČSAV, 28, č. 1, GGÚ ČSAV, Brno, s. 55-74.
MULDERS, M. A. (1987): Remote Sensing in Soil Science. Elsevier, Amsterdam, 379 s.
SHALLAL, J. K., JÁSIM, J. S. (1987): Chemical Study of Characteristics of some „Dust Storms" in Sherqait Region (Mosul). Mesopotamian Journal of Agriculture, 19, č. 1, Baghdad, s. 93-101.
STRÁNÍK, Z. a kol. (1987): Základní geologická mapa 1:50 000, list 34-21 (Hustopeče), ÚÚG, Brno (rukopis).
VLČEK, V. (1971): Regiony povrchových vodv ČSR. Mapa 1:500 000, GgÚ ČSAV, Brno.
WISCHMEIER, W. H., JOHNSON, C. B., CROSS, B. V. (1971): A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, 26, č. 1, s. 189-193.
ZACHAR, D. (1970): Erózia pôdy. Vydavateľstvo SAV, Bratislava, 527 s.

Summary

DETECTION AND TWO-STEP CLASSIFICATION OF EROSIONAL DAMAGES WITH HELP OF SOIL SAMPLE ANALYSIS AND SATELLITE IMAGES

The area of study in the Central Moravian Carpathians has been chosen for presentation of the two-step soil data processing for erosional damages estimation. This area has rich black chernozems on the light parent material (loess, sand, clay, sandstone, claystone, marlstone). Damages by soil erosion are always well visible in the landscape.

Terrestrial data on soil conditions and vegetation cover were collected in the same time the Landsat satellite passed over the area (May 10, 1987). In the following years data on soil colour were collected (under similar meteorological conditions) and various measurements and laboratory analyses were carried out (humus, $CaCO_3$ contents, pH, conductivity, etc.). The data were clustered in order to obtain different erosional soil groups. Three main groups have been detected: heavily, moderately and slightly/no damaged soils.

NDVI calculations have been carried out in order to separate vegetation free and vegetation covered areas on the Landsat TM satellite images. Training areas were established in the proximity of classified soil sample sites and used for the MLC (maximum likelihood classification) of the unmasked part of the satellite image. As much as 95 % of soils in the vegetation-free territory were classified into the three above mentioned soil groups. The built-up areas were separated from the final product with help of a special hand-made mask. In this way the classified laboratory data were carefully spread into the area of study. Field samples confirmed correct results of the laboratory analysis in over 90 % of cases.

Fig. 1 – Study territory
Fig. 2 – Soil cover: 1 – typical chernozems, 2 – calcic chernozems, 3 – pelic chernozems, 4 – haplic chernozems, 5 – luvic chernozems, 6 – gleyic phaeozems, 7 – calcaro-gleyic phaeozems, 8 – calcaro-mollic gleysols, 9 – alcalo-mollic gleysols, 10 – calcic fluvisols, 11 – orthic luvisols, 12 – eutric cambisols.

Fig. 3 – Three dimensional model of clusters of soil samples from erosional viewpoint (1 – heavy damages, 2 – moderate damages, 3 – slight/no damages).
Fig. 4 – Soil erosional classes separability in scatterplot diagrams – TM band 3 & 4, band 4 & 5. A – standard state, B – moderately damage, C – heavily damage, D – forest, E – water.
Fig. 5 – Combined results of the soil sample clustering and TM image MLC for the selected part of Central Moravian Carpathians. Soils: 1 – heavily damaged, 2 – moderately damaged, 3 – slightly/no erosionally damaged, 4 – unclassified, 5 – masked).

(Pracoviště autorů: katedra chemie životního prostředí a ekotoxikologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno.)

Do redakce došlo 2. 4. 1996 *Lektorovali Zdeněk Kliment a Luděk Šefrna*