GEOGRAFICKÝ ČASOPIS

48 1996 1

*Marcel Šúri**

ANALÝZA A HODNOTENIE MOŽNOSTÍ VYUŽITIA DIAĽKOVÉHO PRIESKUMU ZEME VO VÝSKUME ERÓZIE PÔDY

Marcel Šúri: Analysis and evaluation of the application of remote sensing in soil erosion research. Geogr. čas., *48*, 1, 85 refs.

The article presents an overview of the evolution and contemporary state of remote sensing application for soil erosion research. Through the analysis of accessible literature methods of visual and digital interpretation of aerospace data are evaluated within the broader context of soil survey and landscape research. The principal trends and approaches in the identification, assessment and mapping of soils affected by erosion/deposition processes are summarised. The role of remote sensing in soil erosion modelling is also discussed. The advantages and limits of the considered data and methods are evaluated. The future development is seen in integration of remote sensing with other types of data and methodical approaches. Geographical information systems provide effective tools for such kind of task.

Keywords: remote sensing, soil erosion, aerospace data, visual and digital interpretation, geographical information system

ÚVOD

Zvýšená intenzita a rozsah degradácie pôdy, podmienenej najmä človekom, kladie vyššie požiadavky na zber *údajov*, a najmä na ich transformáciu na *informácie* (Zinck 1990). Popri tradičných metódach terénneho a laboratórneho výskumu sa v oblasti zberu údajov a získavania informácií o pôde čoraz viac uplatňujú matematické modely a diaľkový prieskum Zeme. Erózno-akumulačné procesy, ako jedna zo skupín degradačných procesov, sú predmetom interdisciplinárneho výskumu. *Cieľom*

*Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava

práce je analyzovať a zhodnotiť - z hľadiska širšieho kontextu výskumu pôd - možnosti využitia metód interpretácie údajov diaľkového prieskumu Zeme (DPZ) na identifikáciu, hodnotenie a mapovanie pôd postihnutých erózno-akumulačnými procesmi, ako aj na modelovanie týchto procesov a hodnotenie protieróznych opatrení.

1 PÔDA VO VZŤAHU K ERÓZNO-AKUMULAČNÝM PROCESOM, METÓDY VÝSKUMU

Východiskom pre uvedenie problematiky využívania diaľkového prieskumu Zeme pre výskum erózie pôdy je teoretická koncepcia krajiny (krajinnej sféry) rozpracovaná v práci Krcho (1990). Ďalej v zmysle práce Súri (1993) uvádzam termín *objekt krajiny*, pod ktorým rozumieme (na základe zvoleného kritéria) výrez z krajiny, reprezentovaný na snímke alebo obrazovom zázname areálom (množinou pixlov) s podobnými spektrálnymi, texturálnymi alebo fyziognomickými znakmi vyplývajúcimi zo stavových veličín komponentov krajiny, nachádzajúcich sa v zóne interakcie elektromagnetickej radiácie so zemským povrchom.

Z celého spektra procesov pôsobiacich na pedo-geomorfologickú zložku krajiny sa sústreďujeme najmä na *erózno-akumulačné procesy podmienené zrážkovou vodou*, pod ktorými, v zhode s prácou Lehotský a Stankoviansky (1992), uvažujeme sumu modelujúcich účinkov dažďovej vody, ako i vody z roztopeného snehu, tečúcej po svahu. Tento súbor procesov, často označovaný zjednodušene ako *vodná (zrážková) erózia pôdy*, má za následok plošný alebo líniový splach horných vrstiev pôdneho profilu, stratu organickej hmoty a živín, zhoršovanie štruktúry a vodného režimu pôdy, znižovanie pôdnej úrodnosti a poškodzovanie rastlinného krytu. Neoddeliteľnou súčasťou procesu erózie je aj transport erodovaného materiálu a jeho následná akumulácia. Ako uvádzajú viacerí autori (Zachar 1982, Midriak 1970, 1983 a i.), od 50. rokov sa i u nás tejto problematike venuje viacero pracovísk a odborníkov rôzneho zamerania, pričom je zrejmá nedostatočná koordinácia výskumu.

Erózno-akumulačné procesy podmienené zrážkovou vodou predstavujú podľa práce Minár a Hofierka (1992) systém, na ktorom sa z komponentov krajiny dominantne podieľajú najmä pôda, vegetácia, voda, reliéf a atmosféra. Relevantné väzby medzi komponentmi, dané eróznymi subprocesmi, sú determinované súborom vlastností uvedených komponentov. Predmetom štúdia rôznych prístupov výskumu je buď analýza vlastností komponentov, (sub)procesov alebo ich prejavov s cieľom optimalizácie využitia pôdy. Keď vychádzame z prác Schmugge et al. (1980), Zinck (1990), Fulajtár (1995a), *metódy zberu údajov a získavania informácií o erózii pôdy* možno rozdeliť do troch skupín:

1. *Metódy terénneho a laboratórneho výskumu* sa považujú za základ výskumu erózie pôdy. Výhodou tejto širokej skupiny metód (pozri Zachar 1982, Midriak 1983) je získanie relatívne presných údajov vzťahujúcich sa k jednotlivým bodom (úsekom, prispievajúcim plochám) merania v jednom alebo vo viacerých časových horizontoch. Nevýhodou uvedených metód je obmedzená priestorová platnosť takto získaných informácií, kde interpolácia, resp. extrapolácia odvodených informácií do širšieho priestoru je podmienená istou mierou subjektivity a intuície. Nevýhodou je tiež pomerne veľká časová a finančná náročnosť.

2. Ďalšou skupinou metód sú *matematicky formulované prognostické modely* založené na analyticko-fyzikálnom alebo empiricky-štatistickom základe poznania fungovania systému erózie podmienenej zrážkovou vodou. Prehľad svahových modelov erózie pôdy poskytuje práca Minár a Hofierka (1992). Ich výhodou je možnosť

operatívneho získania priestorových informácií v ľubovoľnom časovom horizonte alebo intervale. Nevýhodou je potreba vstupu rôznych údajov, ktoré sú často ťažko merateľné a niektoré iba empiricky odvoditeľné.

3. Významnou skupinou sú *metódy interpretácie údajov DPZ*. Ich výhodou je možnosť opakovane získavať aktuálne priestorové informácie o rozsiahlych územiach. Údaje DPZ poskytujú synoptický pohľad na študované fenomény v krajine, umožňujú analýzu ich aktuálneho stavu, poskytujú podklady pre kvantifikáciu, modelovanie ich fungovania, predikciu budúcich zmien. Obmedzenia ich využitia vyplývajú najmä z rozlišovacích schopností (priestorovej, časovej, rádiometrickej a spektrálnej; Jensen 1986, Feranec 1990) snímacích systémov, prenosových a záznamových médií.

Jednotlivé metódy a prístupy aplikované individuálne prinášajú len čiastkové pohľady na problémy súvisiace s eróziou pôdy. Trendy základného i aplikačného výskumu 90. rokov usilujúce sa o hlbšie pochopenie podstaty problému hľadajú možnosti ich vzájomného prepojenia. Prvá skupina metód má silné väzby s ďalšími dvoma, najmä v oblasti *kalibrácie* a *verifikácie*. Široký prienik metód matematického modelovania a DPZ sa nachádza v oblasti vzájomných *vstupov* a *výstupov* a *konštrukcie erózno-akumulačných modelov*. Na integráciu údajov a metodických prístupov sa používajú technológie *geografických informačných systémov* (GIS).

2 VÝSKUM ERÓZIE PÔDY METÓDAMI DPZ

Metódy DPZ sa vo výskume pôdy využívajú už niekoľko desaťročí. Vývoj poznania a aplikácií v krajinách vyspelého i rozvojového sveta v rôznych jeho štádiách možno sledovať v celom rade prác, napr. Goosen (1967), Mulders (1987), Irons et al. (1989), Zinck (1990). Už tradične sa používajú najmä detailne prepracované metódy analógovej (vizuálnej) interpretácie leteckých snímok v súčinnosti s terénnym výskumom. Nástup počítačovej a informačnej technológie, komerčná dostupnosť družicových údajov, globálny nárast problémov degradácie pôdy, potreba riešiť ich v rámci rozsiahlych území - to všetko sú faktory, ktoré v 70. rokoch akcelerovali rozvoj digitálnych metód DPZ a súčasne s nimi aj metód GIS. Najmä v 80. rokoch badať nárast záujmu o družicové technológie a údaje jednak v súvislosti so zlepšením ich rozlišovacích schopností (Landsat TM, SPOT HRV), ako aj s novými možnosťami spracovania údajov vyplývajúcimi z rozvoja metód analógovej i digitálnej interpretácie (nové prístupy digitálnej interpretácie, možnosti stereoskopického spracovania, analógová interpretácia podporovaná počítačom a iné). Technologický rozvoj najmä v 90. rokoch je príčinou toho, že sa čiastočne stierajú rozdiely v spôsoboch zberu údajov a stále viac sa vzájomne prelínajú aj spracovateľské a interpretačné postupy.

Vo vzťahu k využívaniu DPZ vo výskume erózie pôdy sa v zahraničnej literatúre teoreticko-metodologické práce často kombinujú so snahou prispieť k praktickému riešeniu tohto problému, a to najmä v krajinách tretieho sveta, čo vyplýva tak z nedostatku pôdnych máp, ako aj z potreby hľadať riešenia. DPZ sa uplatňuje v projektoch od veľmi malých mierok (1:1-5 mil.) na báze využívania družicových údajov až po lokálne štúdie vo veľkých mierkach (1:10 000), ktoré sa opierajú väčšmi o letecké snímky. Príklady takýchto projektov možno nájsť v celom rade prác, napr. Strömquist et al. (1985), Dubucq (1986), Mulders (1987), Lundén et al. (1990), Lantieri et al. (1990).

Hraško et al. (1990) uvádza, že u nás - na rozdiel od iných krajín - sa využívaniu

údajov DPZ vo výskume pôdy dlho nevenovala dostatočná pozornosť. Prvé práce, poukazujúce na význam leteckých snímok, sa objavujú začiatkom 70. rokov (Midriak a Petráš 1972, Karlubíková 1972, Brányiková 1972, Juráni a Šurina 1973). Väčší nárast prác súvisiacich s touto problematikou však možno zaznamenať až v 80. a 90. rokoch (Lipský et al. 1983, Midriak 1983, Hraško et al. 1984, Hraško et al. 1988, Stehlík a Mazikov 1988, Feranec a Kolář 1988, Šefrna 1992, Feranec et al. 1993, Kolény et al. 1993, Fulajtár 1995b a ďalší).

Vývojové trendy v oblasti DPZ vo svete sa odrazili i na rozvoji metód výskumu erózie pôdy, a to v niekoľkých smeroch, ktoré možno v zmysle prác Zachar (1982) a Lantieri et al. (1990) charakterizovať takto:

1. *Identifikácia* a *mapovanie* priestorovej diferenciácie *erózno-akumulačných foriem pôdy* v krajine;

2. Výskum vzťahov medzi pôdnymi vlastnosťami a spektrálnou odrazivosťou umožňuje získať informácie aj o *erodovanosti pôdy*, t.j. hodnotiť kvalitatívny a kvantitatívny vplyv erózie na pôdu;

3. Kvalitatívne a kvantitatívne charakteristiky pôdy, vegetácie a reliéfu odvodené z údajov DPZ sú podkladmi pre analýzy *erodovateľnosti* (náchylnosti pôdy na eróziu) a *intenzity erózno-akumulačných procesov*; tieto charakteristiky tiež vstupujú do *modelov predikcie* a *simulácie*;

4. Spracovanie údajov DPZ v prostredí GIS a možnosti modelovania umožňujú hodnotenie *miery vplyvu pôsobenia jednotlivých faktorov* podmieňujúcich erózno-akumulačné procesy. Výsledky možno použiť ako podklady pre navrhovanie, realizáciu a testovanie *protieróznych opatrení*.

Výskum krajiny metódami DPZ je založený na analýze *interakcie elektromagnetickej radiácie* s *materiálnymi komponentmi krajiny*. Intenzita elektromagnetickej radiácie (EMR) nameranej snímacím systémom je (Strahler et al. 1986, Kolář 1990) funkciou:

- *tokov odrazenej a vyžiarenej EMR od objektov krajiny*, ktoré závisia predovšetkým od priestorovej diferenciácie komponentov krajiny, ich vlastností, od priestorovej a časovej diferenciácie tokov slnečnej radiácie vstupujúcej do krajinnej sféry a od polohy a uhla natočenia snímacieho systému;

- *charakteristík snímacieho systému* (zorný uhol, rozlišovacie schopnosti atď.).

Zmena intenzity nameranej EMR má pre každý stav objektu krajiny svoje priestorové a časové zákonitosti. Na hodnoty intenzity nameranej radiácie majú vplyv predovšetkým vlastnosti komponentov nachádzajúcich sa v zóne interakcie EMR so zemským povrchom. Tieto (Kolář 1990) charakterizujú *vnútorné charakteristiky merania*. Z hľadiska výskumu erózie pôdy podmienej zrážkovou vodou sú relevantné predovšetkým *vlastnosti povrchovej vrstvy pôdy*, *vegetačného krytu*, *vody* a v niektorých prípadoch aj *pôdotvorného substrátu*. Existujú aj faktory, ktoré určujú tú zložku priestorovej a časovej variability spektrálnej odrazivosti, ktorá nemá bezprostredný vzťah k stavovým veličinám objektov krajiny, ako sú *poloha Slnka*, *vplyv reliéfu* a *anizotropných odrazových vlastností zemského povrchu a stav atmosféry*. Spolu s *parametrami snímacieho systému* charakterizujú *vonkajšie charakteristiky merania*.

Z hľadiska erózie pôdy sú predovšetkým zaujímavé možnosti analýzy *vlastností pôdy*, ktoré majú priamy vzťah k erózno-akumulačným procesom. Na spektrálnu odrazivosť jej povrchovej vrstvy vplývajú tieto vlastnosti (Mulders 1987, Irons et al. 1989): *obsah humusu* (organického uhlíka), *vlhkosť* (obsah vody), *mineralogické*

zloženie pôdy, veľkosť pôdnych častíc a *aktuálny stav povrchu pôdy* (z hľadiska spôsobu obrábania). Vo viditeľnej časti spektra EMR sa zmena uvedených vlastností pôdy prejavuje zmenou jej *farby* (Escadafal 1993), pričom je tiež zrejmé, že zmeny uvedených vlastností nie sú podmienené iba erózno-akumulačnými procesmi.

Z ďalších komponentov krajiny, ktoré majú priame väzby na systém erózie pôdy podmienenej zrážkami a ktorých charakteristiky možno interpretovať z údajov DPZ, je vegetačný kryt, reliéf a voda. Z *vlastností vegetačného krytu* sú to tak kvalitatívne charakteristiky - *typ vegetácie*, ako aj kvantitatívne charakteristiky - *index listovej pokrývnosti, objem biomasy* (Tucker 1979, Clevers 1988, Weiser et al. 1986 a i.). Stereoskopické pozorovanie snímok a obrazových záznamov umožňuje interpretovať alebo fotogrametrickými metódami priamo digitálne vyhodnotiť niektoré *charakteristiky (parametre) reliéfu - výšku, sklon, orientáciu, dĺžku svahov, prispievajúce plochy* (Midriak a Petráš 1972, Lantieri et al. 1990). V širších súvislostiach môže byť zaujímavá i možnosť hodnotenia stavu snehovej pokrývky (Dozier 1989) ako zásobárne vody, ktorá v čase topenia pôsobí ako erózny činiteľ.

Vo vzťahu k vizuálnemu (spektrálnemu) prejavu erózno-akumulačných procesov na snímkach a obrazových záznamoch DPZ možno *erózne formy* klasifikovať v zhode s prácami Lantieri et al. (1990), Lundén et al. (1990) takto:

- *formy plošnej erózie* (sheet erosion) - zväčša ide o plochy s lokalizáciou na vrchných a stredných častiach svahov; erodované areály pri pôdach s tmavším vrchným humusovým horizontom v porovnaní s hlbšie ležiacimi horizontmi (pôdotvorným substrátom) sa prejavujú zvýšením spektrálnej odrazivosti elektromagnetickej radiácie (v prípade svetlejšieho vrchného horizontu je prejav odrazivosti inverzný);

- *formy stružkovej erózie* (rill erosion) - malé až stredne veľké líniové formy erózie; v závislosti od veľkosti a rozsahu ich čiastočne možno identifikovať na leteckých snímkach s mierkou 1:20 000 a viac, väčšinou s využitím nepriamych indikátorov (vegetácia, reliéf);

- *formy výmoľovej erózie* (gully erosion) - výrazné líniové formy erózie - sú identifikovateľné na leteckých snímkach, ale i na družicových údajoch s vyššou priestorovou rozlišovacou schopnosťou (SPOT) buď priamo, alebo nepriamo (vegetácia, reliéf). Digitálnymi metódami možno vizuálny prejav eróznych foriem ešte zvýrazniť.

V zmysle prác Feranec a Oťaheľ (1984) a Jensen (1986) je potrebné poukázať na rozdiely medzi analógovou a digitálnou interpretáciou. Pri *digitálnych metódach interpretácie* sa využíva iba *spektrálny znak* (v experimentálnej rovine aj *texturálny znak*), proces spracovania a interpretácie možno charakterizovať nižším stupňom intelektuálnej interakcie interpretátora. Digitálnymi metódami možno určiť iba tie vlastnosti komponentov krajiny, ktoré majú priamy vzťah k eróznemu systému. Ich výhodou však je objektivita a opakovateľnosť. *Metódy analógovej interpretácie* vychádzajú z využívania rozsiahlejšej palety interpretačných znakov - *poloha, tvar, veľkosť, tón (farba), textúra, štruktúra, kontext* - pričom do procesu interpretácie je vložený značný podiel ľudskej práce, čo umožňuje aplikovať postupy, ktoré sú čisto numerickými metódami nezvládnuteľné, avšak na druhej strane zaťažené vyšším stupňom subjektivity a unikátnosti.

Okrem *priamych indikátorov*, ktoré majú vzťah k vlastnostiam komponentov krajiny relevantným z hľadiska erózie, sa - podľa prác Goosen (1967), Bennema a Gelens (1969, in: Mulders 1987), Juráni a Šurina (1973), Mulders (1987) - v analógovej interpretácii využívajú aj *nepriame indikátory*, ako sú *relatívna poloha areálov erózie a akumulácie, skeletnatosť, využitie krajiny (land use), priestorová štruktúra*

vodných tokov, spôsob usporiadania parciel, terasovanie a uplatnenie iných protieróznych opatrení.

2.1 METÓDY ANALÓGOVEJ INTERPRETÁCIE ÚDAJOV DPZ

Táto skupina metód už tradične vychádza z aplikácie leteckých snímok. Samotný proces pozostáva z vyhraničenia priestorových jednotiek erodovanej, resp. neerodovanej pôdy a ich následnej konfrontácie s pôdnymi mapami a prácou v teréne. Detailný prehľad metód využitia leteckých snímok vo všeobecnom výskume pôdy poskytuje Goosen (1967) a Mulders (1987). V 70. rokoch, najmä po uvedení údajov Landsat, bolo možné prekonať hranicu spektrálneho obmedzenia filmových materiálov (0.12-0.90 μm, Mulders 1987) a pre menšie mierky širšie uplatniť analógovú interpretáciu i na družicové údaje. K ešte väčším zmenám došlo po vypustení družice SPOT na obežnú dráhu, ktorá svojimi údajmi začala konkurovať leteckým snímkam v stredných mierkach, a navyše umožňuje uplatniť stereoskopický efekt (pozri práce Dubucq 1986, Mulders 1987, Bocco et al. 1990, Lundén et al. 1990).

S využívaním leteckých panchromatických a multispektrálnych snímok existujú na Slovensku praktické skúsenosti viac ako dve desaťročia. Fotogrametrické metódy štúdia erózie pôdy sa u nás používajú už od 60. rokov (Midriak a Petráš 1972, Petráš a Midriak 1980, Midriak 1983). Začiatkom 70. rokov Juráni a Šurina (1973) poukazovali na možnosti využitia leteckých snímok pri spresňovaní hraníc areálov pôdnej erózie a akumulácie, ich klasifikácii i na optimalizáciu protieróznych opatrení. Ďalej uvádzajú, že na leteckých snímkach možno rozlíšiť erózne formy, ale aj stupeň poškodenia pôdy. Vyhodnotením existujúceho stavu erózie a posúdením pôdnych, geologických a geomorfologických pomerov, ako aj analýzou spôsobu obrábania možno na leteckých snímkach tiež vymedziť územia potenciálne ohrozené eróziou. Napriek významu tejto široko koncipovanej teoreticko-metodologickej práce bol pôdny výskum v *poľnohospodárskej krajine* na Slovensku zameraný viac na spresnenie máp pôdnych a pôdnoekologických jednotiek na optimálne využívanie pôdneho fondu (Hraško et al. 1984, 1988, 1990, Kolény et al. 1993) a na identifikáciu povrchového zamokrenia a vlhkosti pôd (Feranec a Kolář 1988). Väčší záujem o výskum erózie poľnohospodárskych pôd sa objavuje až v 90. rokoch (Fulajtár 1994, 1995b, Šúri a Hofierka 1994, Hofierka a Šúri 1995, Šúri a Lehotský 1995).

Možnosti analógovej interpretácie pre analýzu erózno-akumulačných foriem pôdy sú determinované ich dvoma atribútmi (Lantieri et al. 1990). Sú to:

- *identifikovateľnosť - formy priamo identifikovateľné* (výmoľová erózia a silná plošná erózia) versus *formy identifikovateľné iba na základe nepriamych ukazovateľov* (menej intenzívna plošná a líniová erózia);

- *merateľnosť - procesy merateľné* (výmoľová erózia) a *procesy nemerateľné* (slabá plošná a líniová erózia).

Lantieri et al. (1990) v zhode s Lipským et al. (1983) uvádzajú, že *mierku snímky* je potrebné podriadiť intenzite vizuálneho prejavu fenoménu - pre detailné mapovanie foriem líniovej erózie je potrebné uvažovať s mierkami 1:5 000 a 1:10 000, na mapovanie prejavov plošnej erózie postačujú mierky 1:25 000 a menšie. Použitím menších mierok interpretátor získava lepší prehľad o priestorových súvislostiach krajinných komponentov, čo prispieva tiež ku komplexnejšiemu posudzovaniu vplyvov geomorfologických a geologických štruktúr.

Vzhľadom na časovú premenlivosť najmä líniových foriem erózie je okrem mierky potrebné zvážiť i *čas snímania* záujmového územia. Lipský et al. (1983) uvádza v

zhode s inými, že pre potreby mapovania pôdy je na snímkovanie v našich podmienkach najvhodnejšie jarné obdobie. Na ornej pôde bez vegetácie vtedy výrazne vynikajú tónové (spektrálne) rozdiely spôsobené predovšetkým rozdielmi v obsahu humusu, $CaCO_3$ a pôdnou vlhkosťou.

Z hľadiska použitia rôznych *typov snímkových materiálov* sú pre výrazné zlepšenie interpretovateľnosti výhodné farebné materiály, pretože vernejšie zobrazujú spektrálny prejav povrchu pôdy, panchromatické a infračervené filmové materiály sú však lacnejšie. Najdrahšie sú multispektrálne fotografické materiály.

V prácach Midriak a Petráš (1972), Petráš a Midriak (1980) a Midriak (1983) sa pozornosť sústreďuje na využitie *fotogrametrických pozemných a leteckých snímok* na mapovanie stavu, rozsahu a dynamiky stružkovej i plošnej erózie a deštrukcie pôdy v odlesnených územiach Slovenska, ako aj na územiach nad hornou hranicou lesa. Pri vyhodnocovaní časových radov autori odporúčajú používať snímky vyhotovené v približne rovnakej mierke, ale aj v rovnakom ročnom období, pričom upozorňujú na to, že presné vyhraničenie plôch postihnutých plošnou eróziou môže byť ovplyvnené rozdielnou vlhkosťou povrchovej vrstvy pôdy. Z hľadiska vplyvu reliéfu na priestorové deformácie zobrazeného zemského povrchu je potrebné zvažovať použitie metódy jednosnímkovej alebo dvojsnímkovej fotogrametrie. Stereoskopické pozorovanie najmä pri pozemnej fotogrametrii poskytuje možnosť jednoznačnej a presnej kategorizácie pôdnodeštrukčných javov. Vo veľmi detailných mierkach je možné sledovať dynamiku vývoja a zmien objemu foriem výmoľovej erózie.

V Českej republike na vybraných profiloch v poľnohospodárskej krajine Lipský et al. (1983) študoval vzťah pôdnych vlastností (vlhkosť, farba, obsah humusu, pH, obsah $CaCO_3$) k charakteru prírodného prostredia analýzou denzitometricky nameraných optických hustôt na multispektrálnych leteckých snímkach z fotokomory AFA-39.

Stehlík so spoluautormi (Stehlík a Mazikov 1986, Vasiljev et al. 1988, Stehlík 1989) študoval možnosti identifikácie erózno-akumulačných javov na viacerých lokalitách v rámci bývalého Československa. Na multispektrálnych leteckých snímkach z fotokomory MKF-6 rozlíšili na trávnatých a lesných porastoch v Jizerských horách dva stupne intenzity prejavu líniovej erózie. Štatistickou analýzou separability denzitometricky nameraných hodnôt spektrálnej odrazivosti erodovaných a neerodovaných plôch autori poukázali na možnosti využitia aj metód digitálnej interpretácie uvedených údajov, čo dokumentujú na malom výreze z územia. Pomerne úspešné výsledky priniesla aj metodika identifikácie prejavov líniovej erózie v poľnohospodársky obrábaných oblastiach (lokality Střitež a Jaroměřice), kde ju testovali na plochách osiatych rôznymi plodinami. Analýza možností použitia digitálnych metód na tomto území poukázala na nedostatočnú spektrálnu separabilitu jednotlivých tried. V podmienkach slabých spektrálnych rozdielov medzi vrchným pôdnym horizontom a spodnými horizontmi (pôdotvorným substrátom) je identifikácia erózno-akumulačných foriem nerealizovateľná.

Alam a Harris (1987) porovnaním troch časových horizontov leteckých snímok uskutočnili detailné mapovanie (1:10 000) evolúcie prejavov erózie pôdy v oblasti Glaisdale Moor vo Veľkej Británii, čo umožnilo kvantitatívne vyjadriť nárast erózných stružiek. Metodickým prínosom je snaha o analýzu miery vplyvu vybraných charakteristík pôdy, vegetácie a reliéfu na hodnoty spektrálnej odrazivosti meranej v teréne. Výsledky štatistickej analýzy však nepreukázali existenciu výraznejšieho vplyvu žiadnej z meraných charakteristík.

Kvalitatívne prognózy vývoja erózno-akumulačných foriem je možné uskutočňo-

vať analýzou krajinných komplexov interpretovaných na základe ich fyziognómie a hodnotenia vegetačných a pôdnych typov (Pickup a Chewings 1988). Metódu nepriameho odhadu intenzity erózie uvádza Strömquist et al. (1985). Porovnal letecké snímky z troch časových horizontov na modelovom povodí v Lesothe. Povodie je odvodňované do vodnej nádrže, ktorá bola v priebehu 30 rokov z veľkej časti zanesená, čo umožnilo odhadnúť intenzitu odnosu zo študovaného povodia. Vizuálna interpretácia leteckých snímok v tomto prípade umožnila podrobne zmapovať prispievajúce územia, plošne i líniovo atakované eróziou spolu s lokálnymi akumuláciami.

Bocco et al. (1990) poukazuje na využitie stereoskopického pozorovania snímok SPOT XS v mierke 1:100 000 pre identifikáciu foriem výmoľovej erózie na príklade území v južnom Mexiku. Analógovou interpretáciou vyhraničili geomorfologické jednotky, líniové erózne prvky a využitie krajiny. Integráciou údajov spolu s digitálnym modelom reliéfu v prostredí GIS uskutočnili analýzu plošného výskytu a vzájomných vzťahov medzi erodovanými plochami a využitím krajiny, morfometrickými parametrami reliéfu a geomorfologickými jednotkami. Druhým krokom bolo vytypovanie území najviac ohrozených akcelerovanou eróziou v prípade zachovania, resp. zmeny využitia krajiny, s cieľom navrhnúť preventívne opatrenia.

Fulajtár (1994) použil kombináciu terénneho výskumu a interpretácie panchromatických leteckých snímok na analýzu priestorovej diferenciácie erodovaných pôd na sprašovej pahorkatine v oblasti Rišňoviec. Jej výsledkom bola mapa erodovaných pôd v mierke 1:10 000. V práci je tiež analyzovaná väzba erózie na vlastnosti reliéfu, materskej horniny a pôdy. Nevýhodou je podľa autora nedostatočná rozlíšitelnosť mierne erodovaných pôd a pôd pod rastlinným krytom, ako aj nerovnomerná kvalita snímok.

Významnými atribútmi *leteckých snímok* a z nich odvodených *fotomozaík* alebo *fotomáp* okrem priestorovosti je znížená časová náročnosť, zvýšená presnosť pri vyhraničovaní jednotiek a možnosť mapovať i ťažšie prístupné oblasti. Midriak a Petráš (1972) uvádzajú i ekonomické zhodnotenie prínosu použitia fotogrametrických metód. Základom mapovania najmä v stredných a veľkých mierkach stále ostáva terénny výskum, použitie leteckých snímok ho vhodne dopĺňa, urýchľuje a zefektívňuje. Obmedzením analógovej interpretácie leteckých snímok sú podľa Lantieriho et al. (1990) ťažkosti pri interpretácii plošnej erózie, vplyv vegetácie, jej zvyškov na povrchu pôdy, vplyv spôsobu obrábania, obmedzený synoptický pohľad na územie (okrem práce s fotomozaikami a fotomapami) a v prípade, ak sa má územie pravidelne monitorovať, pomerne vysoké náklady. Posledné dve obmedzenia možno prekonať použitím *družicových obrazových záznamov* alebo ich transformáciou do *družicových (kozmických) obrazových máp* (Feranec 1993). Priestorová rozlišovacia schopnosť družicových údajov (pixel veľkosti 10, 20, 30 a viac metrov) obmedzuje ich použitie na mierky 1:25 000 a menšie. Nemožno na nich priamo identifikovať formy líniovej erózie ale iba pomocou nepriamych ukazovateľov, ako sú zmeny farby (tónu), zmeny vo vegetačnom kryte, vplyv reliéfu atď. Družicové údaje sa ukázali ako efektívne najmä pre regionálne mierky. Možnosti zvýšenia ich vizuálnej interpretovateľnosti spočívajú vo využití stereoskopického efektu (SPOT) a v aplikácii digitálnych metód zvýraznenia obrazu (líniové, priestorové, spektrálne filtre).

2.2 METÓDY DIGITÁLNEJ INTERPRETÁCIE

Rozvoj metód digitálnej interpretácie začal akcelerovať najmä v 80. rokoch. Ich výhodou je možnosť určenia nielen kvalitatívnych, ale aj niektorých kvantitatívnych

charakteristík objektov krajiny. Obmedzenia vyplývajúce z analýzy iba spektrálnych znakov zdôrazňujú potrebu používania údajov z terénnych meraní a iných geografických údajov v rámci GIS. Podľa cieľa výskumu a použitia údajov DPZ možno s istou mierou zjednodušenia vyčleniť dva metodické prístupy:

1. Prístup orientovaný na analýzu *erodovanosti pôdy* na báze štatisticko-empirických metód digitálnej klasifikácie a na báze interpretácie fyzikálno-chemických a biologických vlastností objektov krajiny a

2. Prístup matematického *modelovania erózno-akumulačných procesov* na báze vstupov informácií interpretovaných z údajov DPZ.

Oba prístupy sú charakteristické istou mierou vzájomného prieniku, ktorý sa prehlbuje. Ďalej sústreďujeme pozornosť na údaje družíc Landsat a SPOT získané v odrazenej časti spektra EMR.

Prvým predpokladom využívania digitálnych údajov je aplikácia metód prvotného spracovania. Ide o *geometrické transformácie* polohovo zjednocujúce družicové údaje v údajovej báze geografického informačného systému (Mather 1994) a *rádiometrické korekcie* skreslení vyplývajúcich z vplyvu vonkajších charakteristík merania - *charakteristík snímacieho systému* (v prípade kvantitatívneho porovnávania údajov rôznych snímacích systémov), *časovej variability charakteristík atmosféry* (v prípade analýzy multitemporálnych údajov; Kaufman 1989, Moran et al. 1992), *priestorových a časových zmien vyplývajúcich zo zmeny polohy Slnka nad obzorom a z vplyvu reliéfu* (v prípade analýzy multitemporálnych údajov a výškovo členitého reliéfu; Hall-Könyves 1985, Šúri 1991) a *anizotropných odrazových vlastností zemského povrchu* (Pinter et al. 1990). V ďalšom štádiu je výhodné použiť metódy *spektrálnych transformácií* (pozri Jensen 1986), ktoré zahŕňajú celý rad algoritmov zvýrazňujúcich v údajoch tie vlastnosti objektov krajiny, ktoré signifikantne ovplyvňujú ich spektrálne charakteristiky. Ich použitie zlepšuje interpretovateľnosť údajov pri výraznom zmenšení ich objemu. Spektrálne transformácie tiež umožňujú *čiastočne normalizovať* niektoré rádiometrické skreslenia. Medzi najznámejšie patrí *metóda hlavných komponentov* (pozri Price 1993) a lineárne, resp. nelineárne kombinácie spektrálnych kanálov, označované tiež pojmom *spektrálne indexy* (Musick a Pelletier 1988). Skupina spektrálnych indexov zahŕňa veľa prístupov, z ktorých za zmienku stojí napr. spektrálna transformácia *Tasseled Cap* (Kauth a Thomas 1976, in: Crist a Cicone 1984). Tasseled Cap predstavuje lineárnu kombináciu spektrálnych kanálov tak, že veľká časť ich variability je koncentrovaná do troch príznakov - spektrálnych indexov *brightness*, *greenness* a *wetness*, ktoré priamo súvisia s charakteristikami pôdy, vegetácie a vody (pozri tiež Lundén et al. 1990). Detailnejšie sa touto problematikou zaoberajú práce Perry a Lautenschlager (1984) a Šúri (1993).

2.2.1 Metódy analýzy erodovanosti pôdy

Už začiatkom 70. rokov boli uskutočnené prvé pokusy identifikovať plochy silne erodovanej pôdy v USA použitím nekontrolovanej klasifikácie (Seubert et al., in: Bocco a Valenzuela 1988). Výsledky v zhode s ďalšími autormi poukázali na korelačný vzťah medzi hodnotami spektrálnej odrazivosti povrchovej vrstvy pôdy a stupňom jej erodovanosti. Výsledkom uvedených experimentov bolo už v tom čase hodnotenie, ktoré uvádzalo:

1. I keď pôdy sú typické rôznorodosťou pôdotvorného substrátu, so značnou geografickou variabilitou, sú určité vlastnosti, ktoré charakterizujú procesy erózie a prejavujú sa podobnou spektrálnou odozvou a

2. Faktormi, ktoré najviac ovplyvňujú pôdnu odrazivosť sú mineralogické zloženie, vlhkosť, textúra a obsah humusu.

Kombinované a často aj protichodné pôsobenie rôznych faktorov formuje zložitú priestorovú a časovú mozaiku spektrálnej odrazivosti pôdy, čo komplikuje interpretáciu najmä použitím digitálnych metód. Na zložitosť spektrálneho prejavu pôdy poukázal aj Stehlík (1989), ktorý sa zaoberal pozemným meraním spektrálnych vlastností 7 pôdnych typov na 30 testovacích poľnohospodársky obrábaných plochách. Napriek veľkému rozptylu spektrálnej odrazivosti jednotlivých meraní autor uvádza, že analýzou spektrálnej odrazivosti možno identifikovať pôdy s výraznejšími rozdielmi v obsahu organickej hmoty, vody a v stupni erodovanosti.

2.2.1.2 Štatisticko-empirické metódy digitálnej klasifikácie

Jedným z klasických prístupov identifikácie erodovaných plôch je uplatnenie metód multispektrálnej klasifikácie družicových údajov. Lundén et al. (1990), podobne ako aj Bocco a Valenzula (1988), použili metódu klasifikácie maximálnej pravdepodobnosti údajov SPOT, pričom výsledky následne korigovali analógovou interpretáciou. Výhodná je kombinácia s leteckými snímkami, najmä na trénovacích plochách. Na Slovensku prístup nekontrolovanej klasifikácie areálov ornej pôdy bez vegetácie na údajoch SPOT XS kombinovaný s terénnym mapovaním na vybraných svahoch Trnavskej pahorkatiny uplatnili Šúri a Lehotský (1995). Prístup kontrolovanej klasifikácie obrazového záznamu SPOT PAN použil Fulajtár (1995b) na podobnom krajinnom type v oblasti Rišňoviec.

Price (1993) porovnal možnosti lepšieho odlíšenia vlastností vegetačného a pôdneho krytu z údajov Landsat TM a z tých istých údajov spektrálne transformovaných metódou hlavných komponentov. Nekontrolovanou klasifikáciou odlíšil areály indikujúce erózno-akumulačné procesy v polosuchej nepoľnohospodárskej krajine v USA. Analýzou rozptylu a multiregresnou analýzou zistil, že existuje signifikantný vzťah na jednej strane medzi klastrami hodnôt TM (resp. ich hlavných komponentov) a meraniami v teréne - najmä pokryvnosťou plochy vegetáciou a vypočítaným odhadom celkového množstva erodovanej pôdy (m^3/ha). Autor tiež zdôraznil význam údajov TM v eróznom modeli USLE.

Pickup a Nelson (1984) v polosuchých oblastiach Austrálie, použili simulované údaje MSS nalietané leteckým nosičom. Kombináciou podielov spektrálnych kanálov MSS4/MSS6 a MSS5/MSS6 v lineárnom štatistickom modeli definovali tzv. *index stability pôdy vzhľadom na proces erózie a akumulácie*. Autori uvádzajú, že pri interpretácii je potrebné brať do úvahy časovo premenlivý stupeň pokrytia povrchu pôdy vegetáciou.

Pre lepšie pochopenie erózie a akumulácie je potrebné uplatniť metódy, ktorými možno vyjadriť správanie sa celých krajinných komplexov ako systému. Zmeny v krajine sa neuskutočňujú náhodne. Pre mozaiku erózno-akumulačných foriem v krajine sú charakteristické priestorové vzťahy, ktoré majú svoj prejav v priestorovej diferenciácii hodnôt spektrálnych charakteristík na družicových obrazových záznamoch. Pickup a Chewings (1988) použili analýzu *priestorovej a časovej autokorelácie* hodnôt už spomínaného indexu stability pôdy (pozri Pickup a Nelson 1984) z dvoch časových horizontov. Jej výsledky využili na hodnotenie vývoja erózno-akumulačných javov, celkovej stability územia, zmien priestorovej diferenciácie, diverzity, rozdrobenosti a susedstva erózno-akumulačných foriem. Rozdiely medzi sezónnou variabilitou a dlhodobými zmenami identifikovali analýzou trendu strednej hodnoty a rozptylu indexu stability pôdy.

Komplikovaný prejav spektrálnej odrazivosti pôdy spôsobuje, že multispektrálna klasifikácia aplikovaná bez ďalších údajov a metód je dosť problematická. Ako uvádzajú Lundén et al. (1990) Bocco a Valenzula (1988) k problémom s nedostačujúcou vierohodnosťou výsledkov dochádza pri pokuse o *extrapoláciu informácií* z trénovacích plôch na rozsiahlejšie územie, pri korelácii *spektrálnych tried s kvalitatívnymi či kvantitatívnymi charakteristikami pôdy*, pri *multitemporálnych porovnaniach* atď. Je to dané jednak tým, že zmeny vlastností pôdneho krytu nie sú podmienené iba erózno-akumulačnými procesmi, ale aj tým (čo potvrdzuje tiež Stehlík 1989), že spektrálna odrazivosť pôdy je ovplyvnená celým radom - z hľadiska erózno-akumulačných procesov - irelevantných faktorov prírodného a antropogénneho prostredia (napr. zvyšky vegetácie a stav povrchu pôdy z hľadiska spôsobu obrábania, faktory vonkajších charakteristík merania).

Zhoda panuje v názore na nevyhnutnosť zavedenia obmedzujúcich a doplnkových kritérií pri klasifikácii na elimináciu "rušivých" faktorov. Ďalšie údaje GIS (napr. digitálny model reliéfu) možno použiť na apriórne vyčleňovanie oblastí s vyššou pravdepodobnosťou výskytu erózno-akumulačných javov. Integrácia výsledkov klasifikácie s eróznymi modelmi môže poskytnúť podklady na analýzu priestorovej diferenciácie a intenzity prejavu erózno-akumulačných procesov (Šúri a Hofierka 1994).

2.2.1.1 Metódy digitálnej interpretácie vlastností objektov krajiny indikujúcich erodovanosť pôdy

Ťažisko záujmu výskumu erózie pôdy sa presúva od statických prístupov identifikácie a mapovania jej foriem smerom k jej analýze ako procesu, pričom sa vychádza z poznania fyzikálnej podstaty vzťahov medzi hmotnými a nehmotnými komponentmi krajiny. Pri terénnych metódach sa pozornosť upriamuje na merania zmien pôdnych vlastností vo vzťahu k ich polohe na modelových svahov a v povodiach (Lundén et al. 1990, Lehotský a Stankoviansky 1992, Brubaker et al. 1993 a ďalší) s cieľom pochopiť proces erózie vo vzťahu k antropogénnym vplyvom. Odrazom uvedeného v oblasti modelovania je vývoj najmä fyzikálno-procesných modelov.

Od konca 80. rokov sa v diaľkovom prieskume Zeme úsilie základného výskumu sústreďuje na hlbšie pochopenie a exaktné vyjadrenie fyzikálnych zákonitostí interakcie EMR s jednotlivými komponentmi krajiny. Na základe známych interakčných vzťahov sa hľadajú praktické možnosti využitia družicových údajov pre hodnotenie relevantných vlastností najmä pôdy a vegetácie. Niektoré z týchto vlastností majú vzťah aj k erózno-akumulačným procesom - *povrchová vlhkosť pôdy*, *obsah humusu (organického uhlíka)*, *farba pôdy*, *listová pokryvnosť* a *množstvo biomasy*. Vzťahy medzi družicovými údajmi a údajmi pozemných meraní sa opisujú konštrukciou *empiricko-štatistických* alebo *analyticko-fyzikálnych modelov*. V kontrolovaných podmienkach laboratórií možno parciálne vzťahy určovať aj kvantitatívne. Praktické aplikácie údajov DPZ však túto možnosť obmedzujú (Šúri 1993, Šúri et al. 1994, Šúri a Lehotský 1995).

Väčšina prác sa zameriava na *empiricko-štatistické modely*, v ktorých sa charakteristiky pôdy a vegetácie merané na vybraných plochách v teréne korelujú s ich spektrálnymi charakteristikami. Tento prístup predpokladá: **1.** výber dostatočného množstva reprezentatívnych vstupných údajov (družicových, pozemných meraní, a ďalších doplnkových údajov), **2.** použitie vhodnej spektrálnej transformácie a **3.** elimináciu vplyvu tých vlastností, ktoré vzhľadom na študovaný vzťah pôsobia rušivo. Štatistická povaha empirických modelov však dostatočne neodráža zložité vzťahy medzi EMR a zemským povrchom a regionálne i metodicky ich platnosť obmedzuje.

Vegetácia, najmä v poľnohospodárskej krajine, býva pomocným indikátorom erózno-akumulačných procesov. Za obmedzených podmienok možno využiť dve fytometrické charakteristiky odvodené z digitálnych údajov DPZ (Weiser et al. 1986, Clevers 1988) - *index listovej pokryvnosti* (pomer medzi celkovou plochou listov a plochou pôdy) a *množstvo nadzemnej biomasy*, z ktorých sa dajú určiť ďalšie kvalitatívne alebo kvantitatívne charakteristiky vegetácie. Pri ich výpočte sa vychádza z výrazných rozdielov odrazivosti vegetácie najmä v oblasti červenej a blízkej infračervenej časti spektra EMR v rozdielnych štádiách a podmienkach jej vývoja (Tucker 1979, Cebecauer 1994).

Spôsob interakcie *vody v pôde* s EMR je pomerne výrazný, najmä v oblasti infračervenej časti spektra s trendom poklesu odrazivosti v závislosti od rastu obsahu vody v pôde. Pri analýze empirických závislostí možno využiť metódy spektrálnych transformácií tak, ako to dokumentujú napr. Musick a Pelletier (1988) a Súri et al. (1994).

Už Davis a Swain (1978) poukázali na priamu závislosť medzi *obsahom humusu* (organického uhlíka) v povrchovej vrstve pôdy a jej spektrálnou odrazivosťou. Wilcox et al. (1994) použil v poľnohospodárskej oblasti USA regresný model, ktorým identifikoval signifikantný vzťah medzi údajmi Landsat TM - spektrálne transformovanými metódou hlavných komponentov - a meraniami z terénu.

V oblasti viditeľnej časti spektra EMR je významným indikátorom zmeny pôdnych vlastností *farba*. Vo vzťahu k erózii sa - v podmienkach výraznejšieho kontrastu medzi povrchovým a podpovrchovými horizontmi - postihnuté pôdy prejavujú zmenou spektrálnej odrazivosti, a teda aj zmenou farby. Používanie *Munsellovej farebnej škály* (Munsell Color Company 1950, in: Escadafal et al. 1988) v pôdnom výskume iniciovalo hľadanie vzťahov medzi spektrálnou odrazivosťou pôd a ich farbou. Kvantitatívne možno farbu vyjadriť v C.I.E. trichromatickom systéme (Escadafal et al. 1988) a dať ju do empirického vzťahu s hodnotami *hue*, *value* a *chroma* určenými podľa Munsellovej škály. Spektrálnu odrazivosť povrchovej vrstvy pôdy možno po prepočte predikovať z jej farby určenej v teréne a naopak zo spektrálnych charakteristík možno usudzovať na farbu. Tieto skutočnosti poukazujú najmä na praktické uplatnenie údajov Landsat TM (spektrálne kanále TM1, TM2 a TM3; Escadafal a Courault 1989, Escadafal 1993).

Vzťah spektrálnych charakteristík erózno-akumulačných foriem ornej pôdy bez vegetácie k mocnosti humusového horizontu a k farbe a vlhkosti jej povrchovej vrstvy na modelových svahoch Trnavskej pahorkatiny načrtáva práca Súri a Lehotský (1995).

Možnosti kvantifikácie vlastností pôdy a ich využitie v modeloch súvisí s mierou poznania *vplyvu jednotlivých faktorov na celkovú spektrálnu odrazivosť*. Fyzikálne prístupy poznania interakcií elektromagnetickej radiácie s pôdou a vegetáciou vychádzajú z rozkladu spektrálnych kriviek podľa príspevkov jednotlivých faktorov. Ako uvádzajú Huete (1989), Huete a Escadafal (1991) a Jacquemond et al. (1992) spektrálne charakteristiky pôd môžu varírovať dvoma spôsobmi, a to:

1. Na základe rozdielov vo *svetlosti* (brightness), ktoré sa vzťahujú na množstvo (amplitúdu) odrazenej elektromagnetickej radiácie. Sú hlavným zdrojom spektrálnej odlišnosti pôd a udávajú základný tvar spektrálnej krivky. Všeobecný tvar spektrálnej krivky je daný *veľkosťou*, *geometriou* a *zložením pôdnych častíc*. Svetlosť vo viditeľnej časti spektra vyjadruje zložka Munsellovej škály *value*. Môže ju modifikovať aj *vlhkosť* a *drsnosť povrchovej vrstvy pôdy*. Na modifikácii svetlosti pôdy sa podieľajú aj *vonkajšie charakteristiky merania*.

2. Na základe *zmien tvaru spektrálnej krivky*, ktoré sa vzťahujú k absorpčným vlastnostiam pôdy podmieneným *mineralogickým zložením*, *obsahom organickej hmoty* a *vlhkosťou*. Vo viditeľnej časti spektra EMR sa tieto zmeny prejavujú zmenou hodnôt zložiek Munsellovej škály *hue* a *chroma*.

Teoretické práce tohto druhu majú zásadný význam pre tvorbu *analyticko-fyzikálnych modelov* spektrálnej odrazivosti pôdy a vegetácie, ktoré sú založené na poznaní fyzikálnych procesov radiačných tokov a energetickej rovnováhy. Väčšinou tieto modely nie sú formulované pre praktické aplikácie DPZ, cieľom je skôr prispieť k hlbšiemu pochopeniu interakčných procesov medzi hmotnými a energetickými komponentmi v krajine (pozri Strahler et al. 1986, Goel 1989, David a Simonett 1991). Pokroky v tejto oblasti môžu rozšíriť možnosti aplikácie údajov DPZ v erózno-akumulačných modeloch.

2.2.2 Modelovanie erózno-akumulačných procesov

Modelovanie procesov v krajine sa od 60. rokov rozvíja veľmi dynamicky, pričom významnými reprezentantmi tohto trendu sú modely ako USLE (Wischmeier a Smith 1978, in: Minár a Hofierka 1992), ANSWERS (Beasley et al. 1980, in: Burrough a Hazelhoff 1994), CREAMS (Morgan 1986, in: Pilesjö 1992), WEPP (Nearing et al. 1990), alebo ERDEP (Moore a Burch 1986a, 1986b, Mitášová et al. 1996). Ich vývoj je zameraný najmä na simuláciu procesov povrchového plošného a líniového odtoku z povodia, erózie, transportu sedimentov (alebo polutantov) a akumulácie, s cieľom predikovať možné následky a hodnotiť alternatívne ochranné opatrenia. Do modelov vstupuje celý rad parametrov, ktoré charakterizujú relevantné vlastnosti komponentov krajiny - reliéfu, pôdy, vody, vegetácie, atmosféry - vzájomne prepojených jednotlivými subprocesmi. Aplikácie údajov DPZ si v matematickom modelovaní procesov nachádzajú miesto v prvom rade v subsytéme vstupov.

Najväčšia pozornosť sa venuje empirickému modelu predikcie erózneho odnosu - USLE, ktorý je vyjadrený rovnicou:

$$A = R.K.L.S.C.P,$$

kde A - odnos pôdy ($t.ha^{-1}.r^{-1}$),
R - faktor eróznej účinnosti dažďa,
K - faktor pôdnej erodovateľnosti,
LS - faktor dĺžky a sklonu svahu,
C - faktor pokryvnosti pôdy a
P - faktor protieróznych opatrení.

Problematiku integrácie údajov Landsat a SPOT do modelu USLE, aplikovanú na projekty malých mierok v semiarídnych podmienkach, uvádza Pilesjö (1992). Pokryvnosť pôdy vegetáciou (parameter C) určil z regresných modelov vypočítaných z meraní v teréne a spektrálnych transformácií údajov Landsat MSS, TM a SPOT XS. Faktor P určil kombinovaným prístupom digitálnej a analógovej interpretácie. Výsledky autor využil na porovnanie výpočtu parametra celkového odnosu pôdy (A) pre dve rozdielne mierky, na identifikáciu území, na ktorých je potrebné uplatniť ochranné opatrenia, na analýzu vplyvu jednotlivých faktorov na hodnoty odnosu, a tiež na analýzu vzťahu medzi stratou pôdy a poľnohospodárskou produkciou.

Lantieri et al. (1990) vypracoval originálnu metodiku FAO pre potreby kvalitatívneho hodnotenia rizika erózie pôdy v mierke 1:100 000. Na modelovom území v

Brazílii použili multispektrálne (XS) a panchromatické (PAN) údaje družice SPOT. Digitálnou klasifikáciou údajov XS vyhraničili základné triedy krajinného krytu (faktor *C*). Na mapovanie aktuálneho stavu povrchu pôdy a spôsobu obrábania (faktor *P*) použili kombináciu digitálnej klasifikácie (XS) a analógovej interpretácie (PAN). Stereoskopicky bol z údajov SPOT PAN a leteckých snímok interpretovaný parameter pôdnej erodovateľnosti (faktor *K*). Autori tiež poukazujú na potenciál stereoskopického vyhodnotenia údajov SPOT na spracovania parametrov reliéfu (faktor *LS*).

Jürgens a Fander (1993), v podmienkach Nemecka, podobne aplikovali multitemporálnu kontrolovanú klasifikáciu dvoch súborov Landsat TM na určenie typov krajinného krytu. Na ich základe určili faktor *C*. Výsledkom bolo porovnanie klasifikovaných tried s hodnotami vypočítaného odnosu.

Podobne uvádzajú možnosti využitia družicových údajov na výpočet parametra charakterizujúceho krajinný kryt v modeli ANSWERS práce Walsh (1985, in: Bocco a Valenzuela 1988) a De Roo (1989, in: Minár a Hofierka 1992).

Práca Hofierka a Šúri (1995) načrtáva možnosti dynamického modelovania erózno-akumulačného procesu s využitím fyzikálnych prístupov. V procesnom modeli ERDEP boli na príklade Trnavskej pahorkatiny aplikované metódy interpolácie a geometrickej analýzy skalárnych polí, ako aj spektrálna transformácia Tasseled Cap údajov Landsat TM pre empirický odhad Manningovho koeficientu drsnosti povrchu pôdy. Výsledné hodnoty modelu charakterizujú intenzitu erózie a akumulácie v území pre definovaný časový moment. V modeli je zahrnutý vplyv reliéfu, pričom multitemporálne údaje Landsat TM umožňujú zachytiť priestorové a časové rozdiely vo vlastnostiach povrchu pôdy a pokryvnej vegetácie.

Možnosti využitia údajov DPZ v erózno-akumulačných modeloch sú stále pomerne obmedzené. Z údajov DPZ nemožno získať presné a špecifické údaje, ktoré sú napríklad potrebné do fyzikálnych modelov typu WEPP. Ich význam však spočíva v možnosti extrapolácie diskrétnych informácií do širšieho priestoru a v operatívnosti získania priestorových informácií. Pre stredné a malé mierky sú zaujímavé možnosti stereoskopického spracovania údajov SPOT pre tvorbu digitálneho modelu reliéfu.

3 INTEGROVANÝ PRÍSTUP K RIEŠENIU PROBLÉMU ERÓZIE PÔDY V PROSTREDÍ GIS-u

Vývoj smeruje k väčšej integrácii technológií DPZ a GIS, a to tak po stránke údajov, ako aj metód. Pod pojmom *integrovaný geografický informačný systém* chápeme v zmysle práce Davis a Simonett (1991) jednotný systém bázy údajov s plne rozvinutými metódami spracovania a analýzy tak vektorových, ako aj rastrových údajov. Integrácia vyššieho stupňa umožňuje vzájomnú spoluprácu rastrového a vektorového spracovania, hierarchickú reprezentáciu a objektovo-orientovanú manipuláciu údajov DPZ s plne rozvinutými priestorovými databázovými funkciami a modelovacím jazykom.

Integrácia digitálnych (resp. zdigitalizovaných) údajov DPZ s inými údajmi v prostredí GIS-u má obojstranný význam. Údaje DPZ sa líšia od väčšiny ostatných geografických údajov svojou konzistenciou, vysokou polohovou presnosťou, priestorovou a temporálnou rozlišovacou schopnosťou a nízkym stupňom ľudskej abstrakcie a interpretácie (Davis a Simonett 1991). Kvalitatívne i kvantitatívne informácie získané ich analýzou sú významným zdrojom vstupných údajov pre GIS. GIS je na druhej strane vhodným prostredím na integráciu údajov z rôznych zdrojov, ktoré môžu byť použité pri interpretácii údajov DPZ. Modelovanie priestorových a dyna-

mických javov v krajine je jedným zo stimulujúcich faktorov rozvoja integrovaných a otvorených GIS-ov.

Integrovaný GIS je prostredím, ktoré umožňuje komplexný prístup k erózii pôdy - v rámci riešenia iných problémov degradácie krajiny súvisiacich s povrchovými a podpovrchovými tokmi prírodných a človekom vyprodukovaných látok. Takéto prostredie poskytuje nástroje potrebné pre všetky fázy výskumu v krajine - identifikáciu a mapovanie, analýzu, syntézu, modelovanie, simuláciu a hodnotenie alternatívnych ochranných opatrení.

ZÁVER

Z analýzy dostupnej literatúry možno konštatovať nasledujúce zovšeobecňujúce hodnotenia týkajúce sa využitia údajov a metód DPZ pre výskum erózie pôdy.

Letecké snímky umožňujú detailné štúdium menších území, ale náklady na ich získanie a spracovanie, ako aj časové nároky sú pre rozsiahlejšie územia v porovnaní s družicovými údajmi vyššie. Údaje družice *Landsat* majú nižšu priestorovú rozlišovaciu schopnosť, majú však lepšie spektrálne rozlíšenie. Údaje družice *SPOT* možno vyhodnocovať stereoskopicky (aj pre tvorbu digitálneho modelu reliéfu), majú lepšiu priestorovú a časovú rozlišovaciu schopnosť, ktorá umožňuje ich aplikáciu v detailnejších mierkach (až do 1:25 000), avšak horšie spektrálne rozlíšenie. Cena údajov SPOT je v porovnaní s družicou Landsat po prepočte na 1 km^2 vyššia. Ak je primárnym kritériom výberu lepšia spektrálna rozlišovacia schopnosť údajov alebo z hľadiska mierky (1:100 000 a menšia) postačuje nižšia priestorová a časová rozlišovacia schopnosť, potom sú výhodnejšie údaje Landsat TM. Často sa údaje z oboch nosičov vzájomne kombinujú. Použitie *panchromatických údajov SPOT* a *leteckých snímok* dáva podobné výsledky, rozdiel je v lepšej priestorovej rozlišovacej schopnosti leteckých snímok. Panchromatické údaje SPOT sú však v prepočte na 1 km^2 lacnejšie, a pre mapovanie stredne až silne erodovaných území od mierky 1:25 000 postačujú. Poskytujú komplexnejší pohľad na územie a dajú sa efektívnejšie geometricky a rádiometricky upravovať. Polohová presnosť terénneho mapovania nedosahuje taký stupeň ako s využitím DPZ. GIS v rutinných aplikáciách prispieva k zvýšeniu efektivity spracovania a presnosti výsledkov.

V porovnaní *dvoch metód interpretácie* (analógová versus digitálna) je treba uviesť, že význam oboch je rovnocenný, čo dokazuje i uvádzaný výber z literatúry. Napriek vysokému tempu zavádzania počítačových technológií sa metódy analógovej interpretácie nedostávajú na okraj záujmu. Jednoznačne sa ukázalo, a v praktických projektoch (CORINE, MARS-MERA) sa potvrdilo, že úloha človeka je v procese interpretácie údajov DPZ nenahraditeľná. Väčšia je však previazanosť digitálnych metód s analógovou interpretáciou tak v predspracovateľských fázach (geometrické transformácie, zvýraznenie obrazu), ako aj v priebehu samotnej interpretácie (podpora metódami spektrálnych indexov a klasifikácie) a digitalizácie. V mnohých prácach sa odporúča aplikácia kombinovaných prístupov (Bocco a Valenzuela 1988, Lundén et al. 1990, Lantieri et al. 1990, Pilesjö 1992).

Analýza nákladov a ziskov (cost - benefit analysis) spracovaná v práci Lantieri et al. (1990) poukazuje na skutočnosť, že z hľadiska porovnania všetkých nákladov a ziskov sa vo vzťahu k škodám každoročne spôsobovaným v poľnohospodárstve a vodnom hospodárstve, ukazujú aplikácie DPZ a GIS ako jednoznačný ekonomický prínos, ďaleko finančne prevyšujúci úvahy o finančnej náročnosti na technické a personálne vybavenie a nákup potrebných údajov. Údaje v GIS-e sa môžu navyše

využiť na odhad potenciálnej i reálnej erodovanosti, návrh konkrétnych protieróznych opatrení a na ďalšie krajinno-ekologické a územno-plánovacie účely.

Možnosti aplikácie DPZ pre výskum erózie pôdy najmä v poľnohospodárskej krajine pahorkatín a kotlín Slovensku sú zaujímavé. Vzhľadom na regionálne odlišnosti nielen v prírodných pomeroch ale i kultúrnych tradíciách poľnohospodárskej výroby, v porovnaní so zahraničím, je dôležité uskutočniť sériu experimentálnych prác s cieľom overiť vhodné metodické postupy v našich podmienkach. Integrácia údajov a metód DPZ, GIS a terénneho výskumu je jedným z východísk pre vypracovanie a overenie metodiky aplikovateľnej v praktickom použití v regionálnych i celoštátnej mierke, ktorá výrazne prispeje k inventarizácii a k obohateniu možností hodnotenia kvality poľnohospodárskej pôdy vo vzťahu k súčasnému a historickému spôsobu využitia krajiny.

LITERATÚRA

ALAM, M. S., HARRIS, R. (1987). Moorland soil erosion and spectral reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 593-608.

BOCCO, G., PALACIO, J., VALENZUELA, C. R. (1990). Gully erosion modelling and geomorphologic knowledge. *ITC Journal*, 3, 253-261.

BOCCO, G., VALENZUELA, C. R. (1988). Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. *ITC Journal*, 4, 309-318.

BRÁNYIKOVÁ, I. (1972). Niektoré možnosti využitia leteckých snímok v oblasti pôd. *Poľnohospodárstvo*, 18, 721-726.

BRUBAKER, S. C., JONES, A. J., LEWIS, D. T., FRANK, K. (1993). Soil properties associated with landscape position. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 235-239.

BURROUGH, P. A., HAZELHOFF, L. (1994). Environmental assessment and GIS. In Burrough, P. A., Hazelhoff, L., eds. *Proceedings of EGIS '94 conference, workshop: environmental assessment and GIS, Paris 29.3.-1.4.1994.* Utrecht/Amsterdam (EGIS Foundation).

CEBECAUER, T. (1994). *Analýza vybraných druhov poľnohospodárskych plodín pomocou multitemporálnych údajov družice Landsat TM.* Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava.

CLEVERS, J. G. P. (1988). The derivation of simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 25, 53-69.

CRIST, E. P., CICONE, R. C. (1984). A Physically-based transformation of Thematic Mapper data - the TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22, 256-263.

DAVIS, F. W., SIMONETT, D. S. (1991). GIS and remote sensing. In Maguire, D. J., Goodchild, M. F., Rhind, D. W., eds. *Geographical information systems, principles and application.* Harlow (Longman), pp. 191-213.

DAVIS, S. M., SWAIN, P. H. (1978). *Remote sensing: the quantitative approach.* New York (Mc Graw-Hill).

DOZIER, J. (1989). Remote sensing of snow in visible and near-infrared wavelengths. In Asrar, G., ed. *Theory and applications of optical remote sensing,* New York (Wiley), pp. 527-547.

DUBUCQ, M. (1986). Télédétection spatiale et erosion des sols (Etude bibliographique). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, XXII, 247-258.

ESCADAFAL, R. (1993). Remote sensing of soil color: principles and applications. *Remote Sensing Reviews*, 7, 261-279.

ESCADAFAL, R., COURAULT, M. C. G. D. (1989). Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM Data. *Remote Sensing of Environment*, 27, 37-46.

ESCADAFAL, R., GIRARD, M. C., COURAULT, D. (1988). Modelling the relationship between Munsell soil color and soil spectral properties. *International Agrophysics*, 4, 249-261.

FERANEC, J. (1990). Údaje získané metódami dialkového prieskumu Zeme - zdroj geografických informácií. *Geodetický a kartografický obzor*, 36, 9-11.

FERANEC, J. (1993). Využívanie kozmických údajov DPZ v oblasti tvorby tematických máp - súčasný stav. *Kartografické listy*, 1, 91-96.

FERANEC, J., KOLÁŘ, J. (1988). Physiognomic aspects of the surface water-logging intensity of the soils in the East-slovakian lowland identified by aerospace photographs and images. *Geografický časopis*, 40, 49-61.

FERANEC, J., KOLÁŘ, J., OŤAHEĽ, J., SMOLEN, F., ŠÚRI, M., ŠÚTOR, J. (1993). Analysis of the spectral signatures of ploughed soil without vegetation by Landsat 5 TM Data (an example of the southern part of the Danubian Lowland). In Winkler, P., ed. *Remote sensing for monitoring the changing environment of Europe*. Rotterdam (Balkema), pp. 229-234.

FERANEC, J., OŤAHEĽ, J. (1984). Geographical approach to interpretation of data obtained by remote sensing of earth on the example of analysis of land use (land cover). *Geografický časopis*, 36, 366-377.

FULAJTÁR, E., ml. (1994). Zhodnotenie rozšírenia erodovaných pôd na území PD Rišňovce s využitím panchromatických čiernobielych leteckých snímok. *Vedecké práce Výskumného ústavu pôdnej úrodnosti*, 18, 53-63.

FULAJTÁR, E., ml. (1995a). Methods for determination and assessment of soil erosion. In Čurlík et al. eds. *Present methods in soil protection used in Slovakia and their comparison with german and international standards*. Správa, Výskumný ústav pôdnej úrodnosti, Bratislava.

FULAJTÁR, E., ml. (1995b). Rôzne príklady využitia metód DPZ pre mapovanie erodovaných pôd sprašových pahorkatín Podunajskej nížiny. *Geographia Slovaca* (v tlači).

GOEL, N. S. (1989). Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parametres from reflectance factor data. In Asrar, G., ed. *Theory and applications of optical remote sensing*. New York (Wiley), pp. 205-251.

GOOSEN, D. (1967). *Aerial photo interpretation in soil survey*. Rome (FAO). Soils bulletin, 6.

HALL-KÖNYVES, K. (1985). *Empirical studies of the influence of topography upon Landsat MSS and TM data in gently undulating terrain*. Interná štúdia, Department of Physical Geography, University of Lund, Sweden.

HOFIERKA, J., ŠÚRI, M. (1995). Modelovanie a kartografické zobrazovanie vodnej erózie pôdy s využitím GIS-u a údajov Landsat TM. *Geodetický a kartografický obzor*, 41, 198-203.

HUETE, A. R. (1989). Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. In Asrar, G. ed. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, New York (Wiley), pp. 107-141.

HUETE, A. R., ESCADAFAL, R. (1991). Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques. *Remote Sensing of Environment*, 35, 149-159.

HRAŠKO, J., ILAVSKÁ, B., KOLÉNY, M. (1984). *Zhodnotenie niektorých metód DPZ pre výskum poľnohospodárskeho pôdneho fondu a jeho využitia vo vybraných územiach SSR*. Záverečná správa, Výskumný ústav pôdoznalectva a výživy rastlín, Bratislava.

HRAŠKO, J., KOLÉNY, M., DUBOVCOVÁ, M. (1988). *Metodické princípy spracovania obrazových záznamov a opticko analógovej interpretácie vo vzťahu k vybraným problémom utilizácie poľnohospodárskeho pôdneho fondu*. Výskumná správa, Výskumné centrum pôdnej úrodnosti, Bratislava.

HRAŠKO, J., KOLÉNY, M., ŠÚBERT, A. (1990). Využívanie dialkového prieskumu Zeme v pedológii. *Geodetický a kartografický obzor*, 36, 12-14.

IRONS, J. R., WEISMILLER, R. A., PETERSEN, G. W. (1989). Soil reflectance. In Asrar, G., ed. *Theory and applications of optical remote sensing*. New York (Wiley), pp. 66-106.

JACQUEMOUD, S., BARET, F., HANOQQ, J. F. (1992). Modelling spectral and bidirectional soil reflectance. *Remote sensing of environment*, 41, 123-132.

JENSEN, J. R. (1986). *Introductory digital image processing - a remote sensing perspective*. Englewood Cliffs (Prentice-Hall).

JÜRGENS, C., FANDER, M. (1993). Soil erosion assessment and simulation by means of SGEOS and ancillary digital data. *International Journal of Remote Sensing*. 14, 2847-2855.

JURÁNI, B., ŠURINA, B. (1973). Fotopedológia a jej využitie v podmienkach Slovenska. *Vedecké práce Výskumného ústavu pôdoznalectva a výživy rastlín*, 6, 129-146.

KARLUBÍKOVÁ, E. (1972). Najdôležitejšie faktory poľnohospodárskej interpretácie leteckých snímok. *Poľnohospodárstvo*, 88, 617-626.

KAUFMAN, Y. J. (1989). The atmospheric effect on remote sensing and its corrections. In Asrar, G., ed. *Theory and applications of optical remote sensing*. New York (Wiley), pp. 336-428.

KOLÁŘ, J. (1990). *Dálkový průzkum Země*. Praha (SNTL).

KOLÉNY, M. et al. (1993). Problematika interpretácie stavu pôdneho krytu z multispektrálnych snímok. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae, Geographica*, 32, 65-78.

KRCHO, J. (1990). *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Bratislava (Veda).

LANTIERI, D., DALLEMAND, J. F., BISCAIA, R., SOHN, S., PÖTTER, R. O. (1990). Erosion mapping using high-resolution satellite data and geographic information system. *FAO Remote Sensing Centre Series*, 56.

LEHOTSKÝ, M., STANKOVIANSKY, M. (1992). Detekcia zrážkových erózno-akumulačných procesov na základe stanovenia obsahu izotopu Cs-137 v pôdnom profile. *Geografický časopis*, 44, 273-287.

LIPSKÝ, Z., FACEK, Z., ŠEFRNA, L., TOMÁŠEK, M. (1983). Interpretace leteckých snímků pro zjišťování půdních charakteristík. *Rostlinná výroba*, 29, 79-90.

LUNDÉN, B., STRÖMQUIST, L., NORDSTRÖM, K. (1990). An evaluation of soil erosion intensity mapping from SPOT satellite imagery by studies of colour air-photos and topsoil content of 137 Caesium. In Strömquist, L., ed. *Monitoring soil loss at diferent observation levels*. Uppsala Universitet Naturgeografiska Institutionen Rapport, 74, 13-37.

MATHER, P. M. (1994). *Map-image registration using least-squares polynomials: a sensivity analysis*. Working Paper, 25. University of Nottingham, Department of Geography, Nottingham.

MIDRIAK, R. (1970). Výsledky 20-ročného výskumu erózie pôdy na Slovensku. *Poľnohospodárstvo*, 16, 1085-1099.

MIDRIAK, R. (1983). *Morfogenéza povrchu vysokých pohorí*. Bratislava (Veda).

MIDRIAK, R., PETRÁŠ, J. (1972). Mapovanie a skúmanie deštrukcie a ochrany pôdy nad hornou hranicou lesa fotogrametrickými metódami. *Lesnícky časopis*, 18, 255-267.

MINÁR, J., HOFIERKA, J. (1992). Svahové modely vodnej erózie pôdy, súčasný stav a perspektívy, *Geografický časopis*, 41, 330-341.

MITÁŠOVÁ, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., IVERSON, L. R. (1996). Modelling topography potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of GIS* (v tlači).

MOORE, I. D., BURCH, G. J. (1986a). Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Resources Research*, 22, 1350-1360.

MOORE, I. D., BURCH, G. J. (1986b). Modelling erosion and deposition: topographic effects. *Transactions of the American Society of Agicultural Engineers*, 29, 1624-1630.

MORAN, M. S., JACKSON, R. D., SLATER, P. N., TEILLET, P. M. (1992). Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface factors from satellite output. *Remote Sensing of Environment*, 41, 169-184.

MULDERS, M. A. (1987). *Remote Sensing in Soil Science*. Amsterdam (Elsevier).

MUSICK, H. B., PELLETIER, R. E. (1988). Response to soil moisture of spectral indexes derived from bidirectional reflectance in Thematic Mapper wavebands. *Remote Sensing of Environment*, 25, 167-184.

NEARING, M. A., LANE, L. J., ALBERTS, E. E., LAFLEN, J. M. (1990). Prediction technology for soil erosion by water: Status and research needs. *Soil Science Society of America*

Journal, 54, 1702-1711.

PERRY, C. R., LAUTENSCHLAGER, L. F. (1984). Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 14, 169-182.

PETRÁŠ, J., MIDRIAK, R. (1980). Využitie fotogrametrických metód pri sledovaní eróznych procesov. In *Protierózna ochrana pôdy, Trnava 8.-10.10.1980*. Trnava (Poľnohospodárska spoločnosť ČSVTS), pp. 156-162.

PICKUP, G., CHEWINGS, V. H. (1988). Forecasting patterns of soil erosion in arid lands from landsat MSS data. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 69-84.

PICKUP, G., NELSON, D. J. (1984). Use of Landsat radiance parameters to distinguish soil erosion, stability, and deposition in arid central Australia. *Remote Sensing of Environment*, 16, 195-209.

PILESJÖ, P. (1992). *GIS and remote sensing for soil erosion studies in semi-arid environments - Estimation of soil erosion parameters at different scales*, Lund (Lund University Press).

PINTER, P. J. Jr., JACKSON, R. D., MORAN, M. S. (1990). Bidirectional reflectance factors of agricultural targets: a comparison of ground-, aircraft-, and satellite-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 32, 215-228.

PRICE, K. P. (1993). Detection of soil erosion, within finyon-juniper woodlands using Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 45, 233-248.

SCHMUGGE, T. J., JACKSON, T. J., McKIM, H. L. (1980). Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*, 16, 961-979.

STEHLÍK, O. (1989). Příspěvek k poznání spektrálních vlastností půd jižní Moravy. In Sekaninová, D., ed. *Sborník prací*, 23, Brno (Geografický ústav ČSAV), pp. 93-101.

STEHLÍK, O., MAZIKOV, V. (1986). Izučenie processov erozii počv na poligonach territorii ČSSR po materialam mnogozonalnoj sjemki. In Plánka, L., Mamedov, R., eds. *Rezultaty sovmestnych, sovetsko-čechoslovackych podsputnikovych experimentov*, 11, Brno (Geografický ústav ČSAV), pp. 183-201.

STRAHLER, A. H., WOODCOCK, C. E., SMITH, J. A. (1986). On the nature of models in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 20, 121-139.

STRÖMQUIST, L., LUNDÉN, B., CHAKELA, Q. (1985). Sediment sources, sediment transfer in a small Lesotho catchment - A pilot study of the spatial distribution of erosion features and their variation with time and climate. *South African Geographical Journal*, 67, 3-13.

ŠEFRNA, L. (1992). Pedologické vyhodnocování dostupných materiálů DPZ. In Žídek, V., ed. *Aktuální metody dálkového průzkumu Země, včetně aplikací GIS*. Brno (VŠZ), pp. 55-60.

ŠÚRI, M. (1991). Vplyv reliéfu na priestorovú diferenciáciu dát družice Landsat 5. *Geografický časopis*, 43, 27-43.

ŠÚRI, M., (1993). Využitie digitálnych metód spracovania družicových dát pre analýzu vybraných vlastností objektov krajiny. *Geografický časopis*, 45, 279-292.

ŠÚRI, M., FERANEC, J., CEBECAUER, T. (1994). Určovanie obsahu vody v pôde výpočtom spektrálnych indexov z údajov Landsat TM. *Geografický časopis*, 46, 247-265.

ŠÚRI M., HOFIERKA J. (1994). Soil water erosion identification using satellite and DTM data. In Harts, J. J. et al., eds. *Proceedings of EGIS/MARI '94 European conference and exhibition on GIS, Paris 29.3.-1.4.1994*. Utrecht/Amsterdam (EGIS Foundation), pp. 937-944.

ŠÚRI, M., LEHOTSKÝ, L. (1995). Identifikácia erózie pôdy použitím údajov družice SPOT. *Geographia Slovaca*, 10, 265-272.

TUCKER, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.

VASILJEV, L. N., VANEČKOVÁ, L., GARELIK, I. S., KAČINSKI, P., MAZIKOV, V., STEHLÍK, O. (1988). Čislennye metody izučenia počv i rastiteľnosti po distancionnym dannym. In Vasiljev, L. N., ed. *Issledovanie počv i rastiteľnosti distancionnymi metodami (metodičeskoe rukovodstvo)*, 17, Brno (Geografický ústav ČSAV), pp. 169-263.

WEISER, R. L., ASRAR, G., MILLER, G. P., KANEMASU, E. T. (1986). Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements. *Remote Sensing of Environment*, 20, 141-152.

WILCOX, C. H., FRAZIER, B. E., SHANE, T. B. (1994). Relationship between soil organic carbon and Landsat TM data in Eastern Washington. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 777-781.

ZACHAR, D. (1982). *Soil Erosion*. Amsterdam (Elsevier).

ZINCK, J. A. (1990). Soil Survey: epistemiology of a vital discipline *ITC Journal*, 1990-4, 335-351.

Marcel Šúri

ANALYSIS AND EVALUATION OF THE APPLICATION OF REMOTE SENSING IN SOIL EROSION RESEARCH

Research of erosion/deposition processes is of multidisciplinary nature. Various approaches have been applied - field/laboratory research, mathematical modelling and remote sensing. The focus is set to different aspects of soil erosion problems, such as identification and mapping of the erosion/deposition forms, assessment of soil erosivity, erodibility, analysis of influence of relevant landscape components, process intensity modelling at different conditions and evaluation of proposed counter-erosion measures.

The article reviews contribution of remote sensing methods to investigation of the mentioned set of problems. The outline of the study comes out from the system theory of landscape defined by Krcho (1990). The emphasis is put to the processes of water erosion - as defined by Lehotský and Stankoviansky (1992) - to the analysis of landscape components that mutually interact in the erosion/deposition system (Minár and Hofierka 1992) and to relevant features that can be detected through remote sensing. The two distinct remote sensing methods have been separately discussed - visual (analogue) and digital interpretation. The aspects of data, their sources, scale, their advantages and limits and existing interpretation methods are discussed. Application of the interpreted remote sensing data as an input to either empirical or process-based erosion models is also considered.

Visual interpretation of aerial photographs has a long tradition in soil survey (Goosen 1967, Mulders 1987, Zinck 1990). Since 1980s the satellite data have been more widely applied. The increasing availability of Landsat and SPOT data gives also opportunities for development and application of digital image processing methods in soil erosion research. Examples of soil erosion projects worked out for different scales are documented in studies by Strömquist et al. (1985), Dubucq (1986), Lundén et al. (1990), Lantieri et al. (1990).

The application of aerial photographs in soil survey in former Czecho-Slovakia has started in the beginning of 1970s (e. g. Midriak and Petráš 1972, Juráni and Šurina 1973). The expansion of remote sensing can be seen in 1980s (e. g. Midriak 1983, Hraško et al 1984, 1988, 1990, Stehlík and Mazikov 1988). This period reflects also first studies of satellite data interpretation (Feranec and Kolář 1988). Nevertheless, in Slovakia the emphasis was put dominantly on the application of aerospace data in soil mapping. Besides this, a set of studies investigating problems of soil water content and waterlogging can be traced (e. g. Feranec et al 1993, Kolény et al. 1993). 1990s reflect increased attention of remote sensing studies for soil erosion identification (Fulajtár 1994, 1995), analysis of relevant soil properties (Šúri and Lehotský 1995) and integration with other GIS data to reveal the soil erosion/deposition pattern (Šúri and Hofierka 1994). Besides these experiments also computation of input parameters to process-based model ERDEP was tested (Hofierka and Šúri 1995).

Trends of integration various data types and methodical approaches are seen to be prospective to fulfil future needs for better understanding of erosion related problems. Geographical information systems provide effective tools for this task.

Translated by the author