

Digitálne modely reliéfu a ich aplikácie v životnom prostredí

M. Šúri, T. Cebecauer, J. Hofierka: Digital Terrain Models and their Environmental Applications. Život. Prostr., Vol. 37, No. 1, 30 – 35, 2003.

Digital terrain model (DTM) presents a set of georeferenced data characterizing geometric properties of relief (i. e. elevation and morphometric characteristics) that are computed from input elevation points using interpolation method. The accuracy of input data, interpolation method and spatial resolution of output rasters are factors determining the quality of the results. One of the most appropriate interpolation algorithms for environmental applications is the regularized spline with tension. This method was applied for computation of the DTM of Slovakia with spatial resolution of 25 meters and for DTMs at detailed scales. The examples of environmental DTM applications are presented. They relate to the wide spectrum of methods of mapping, spatial data inventory, analysis, modeling and visualization.

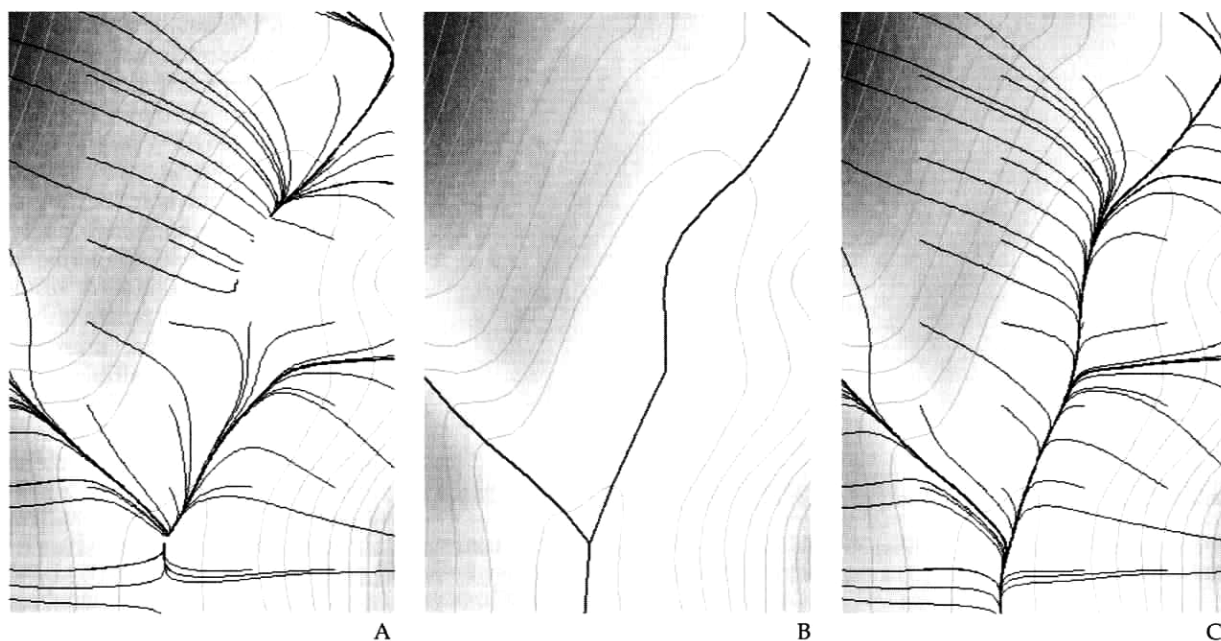
Tvar reliéfu je výslednicou rôzne pôsobiacich síl, pričom reliéf zároveň ovplyvňuje procesy a javy v krajine, ako aj aktivity ľudskej spoločnosti. *Digitálny model reliéfu* (DMR) predstavuje množinu polohovo priradených údajov charakterizujúcich geometrické vlastnosti reliéfu (t. j. nadmorskú výšku a ďalšie morfometrické ukazovatele – sklon, orientáciu, krivosť reliéfu) vypočítaných na základe vstupných výškových bodov a vhodnej interpolačnej metódy. V technickej praxi, ako aj v zahraničí, sa používa aj termín *digitálny model terénu* (DMT), ktorý je však čiastočne významovo odlišný, pretože neobsahuje implicitne aj morfometrické ukazovatele reliéfu a niekedy sa do neho zahŕňajú aj technické prvky v krajine (napr. cesty a zárezy). Cieľom príspevku je uviesť prehľad dostupných typov údajov a metód na tvorbu digitálnych modelov reliéfu, ako aj príklady ich výpočtu a využitia v environmentálnych projektoch.

Zdroje vstupných údajov a metódy tvorby DMR

Význam DMR podčiarkuje skutočnosť, že vo väčšine dostupných softvérov GIS existuje modul na jeho tvorbu. Funkčnosť takýchto softvérov býva rozdielna, ani správne použitie implementovaných metód nie je triviálne, nakoľko vyžaduje odborné znalosti o modelovaní reliéfu a jeho morfometrickej analýze. Najpoužívanejšou formou priestorovej reprezentácie DMR je pravidelná sieť (raster, grid) alebo nepravidelná trojuholníková sieť

(triangulated irregular network – TIN). Environmentálne aplikácie kladú väčší dôraz na špecifické vlastnosti DMR (napr. hladkosť jeho priebehu), a preto sa v tejto oblasti väčšmi presadilo používanie rastra. V technickej praxi sa dôraz kladie na presnosť a detailnosť, najmä v kombinácii s technickými prvkami reliéfu (projektovanie stavieb). DMR sa tu aj na základe určitej tradície častejšie reprezentuje vo forme trojuholníkovej siete.

Kvalita vstupných údajov je jedným z kľúčových faktorov tvorby DMR, pretože od nej závisí prenos a znásobovanie chýb v ďalších analýzach. Vstupné údaje možno získať z rôznych zdrojov – vektorizáciou vrstevníc z topografických máp, z údajov diaľkového prieskumu Zeme (DPZ – leteckých meračských snímok, satelitných údajov, LIDAR-u), geodetickým meraním, prípadne pomocou GPS (Global Positioning System). Presnosť vstupných údajov sa podľa použitých zdrojov výrazne líši, čo podmieňuje ich využitie. Pri tvorbe DMR v mierke 1 : 10 000, alebo menej podrobných, sa často využívajú digitalizované vrstevnice. Reprezentácia reliéfu na mapách týchto mierok je však generalizovaná, a preto na účely detailného modelovania prírodných procesov (napr. tečenia vody po povrchu, zmien spôsobených eróziou) je vhodnejšie siahať po fotogrametricky nameraných údajoch z leteckých snímok alebo po údajoch z laserového skenera LIDAR (Light Detection And Ranging). Problém rýchleho zastarávania máp stredných mierok technicky riešia satelitné údaje (napr. Ikonos,



1. Tvorba hydrologicky korektného DMR: A – spádnice vygenerované z DMR vytvoreného z pôvodných vrstevníc, B – zvýraznenie kostry reliéfu v pôvodných vstupných údajoch doplnkovými výškovými bodmi v oblasti koryta vodného toku, C – spádnice vygenerované z novovytvoreného DMR

QuickBird, Spot 5) s rozlíšením rastra 1 – 5 m. Keďže je viacero možností ako získať údaje o reliéfe daného územia, objavujú sa aj vstupné súbory údajov, v ktorých sú skombinované rôzne zdroje, napr. vrstevnice a merania pomocou GPS.

Ďalším faktorom ovplyvňujúcim kvalitu DMR je interpolačná metóda. Medzi najpoužívanejšie patrí interpolácia pomocou vážených priemerov, rôzne variačné alebo geoštatistické metódy (Mitas, Mitasova, 1999). Výber vhodnej metódy závisí predovšetkým od účelu DMR a jeho rozlíšenia. Presnejšie metódy zvyčajne vyžadujú lepšiu znalosť a výber vhodných parametrov. Medzi najpresnejšie metódy, vhodné najmä na environmentálne účely, patrí regularizovaný splajn s tenziou (regularized spline with tension, RST). Táto globálna splajnová metóda má rad vlastností (napr. diferencovateľnosť, flexibilitu, lokálne správanie a segmentovateľnosť spracovania), vďaka ktorým možno dosiahnuť vysokú kvalitu interpolácie a spracovať neobmedzený objem vstupných údajov. Metóda umožňuje priamy výpočet morfometrických ukazovateľov reliéfu, často využívaných v environmentálnych analýzach. Táto funkcia je implementovaná v GIS GRASS ako príkaz *s.surf.rst* (Neteler, Mitasova, 2002).

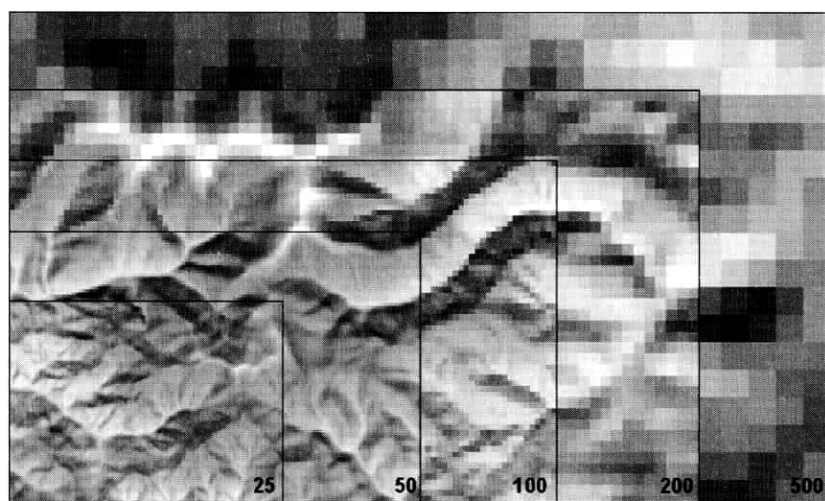
Kvalita interpolačnej metódy závisí od jej schopnosti spracovať rôzne typy vstupných údajov. Pri nedostatočnej hustote, resp. nehomogenite vstupného bodového poľa (prechod z aluviálnej roviny do pohoria, horský reliéf) alebo pri použití nevhodných parametrov interpo-

lácie generuje interpolačná metóda umelé tvary, ako napr. depresie v úpätiach svahov a zvlnenie v okolí vrstevníc. Tieto neprirodzené tvary reliéfu možno eliminovať expertným doplnením výškových bodov a vrstevníc, najmä v oblasti tzv. kostry reliéfu (údolnice a chrbátice), apriórny vyčlenením depresii alebo použitím špeciálnych algoritmov na vyplňanie depresii. Uvedenými prístupmi možno vytvoriť hydrologicky korektný DMR, ktorý zabezpečuje podmienku kontinuity pohybu hmoty (napr. vody so sedimentmi, obr. 1). Viac informácií o tvorbe DMR možno nájsť na webovej stránke (A).

Dôležitá je tiež voľba optimálneho priestorového rozlíšenia výsledných rastrov, ktorá závisí nielen od mierky a použitia DMR, ale aj od kvality vstupných bodov a ich informačnej hustoty. Priestorové rozlíšenie je určené veľkosťou strany bunky rastra, pričom sa môže pohybovať v rozsahu od 1 – 5 metrov pri aplikáciách vo veľkých mierkach (do 1 : 10 000) až po niekoľko desiatok až stoviek metrov pri aplikáciách v regionálnych až globálnych mierkach. Zmena rozlišovacej úrovne DMR má zvyčajne za následok zmenu priestorového priebehu morfometrických ukazovateľov.

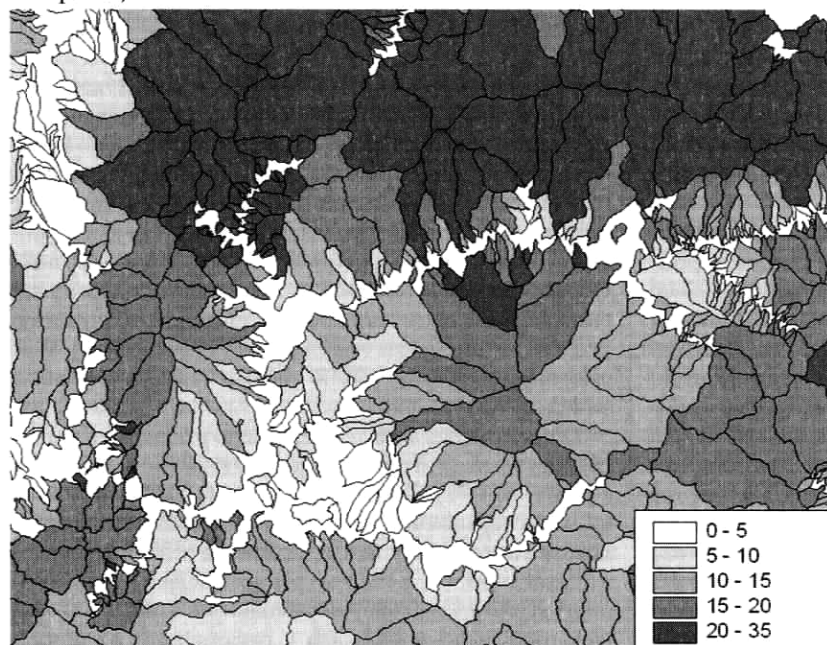
DMR Slovenska

Rozvoj výpočtovej infraštruktúry a dostupnosť veľkého množstva geografických informácií v digitálnej forme



2. Porovnanie priestorového rozlíšenia rastra výšok digitálneho modelu reliéfu Slovenska (m)

3. Priemerný sklon malých povodí Slovenska odvodený z DMR50-SK (hodnoty v stupňoch)



umožňuje efektívne spracovať veľké objemy údajov z rozsiahleho územia s vysokým rozlíšením. Jedným z významných údajových súborov vhodných pre environmentálne, ale aj technické aplikácie, je DMR Slovenska s rozlíšením rastra 25 m (DMR25-SK).

Vstupný súbor údajov pozostáva zo 16,5 mil. bodov

získaných z vrstevnic a výškových kót 137 základných máp v mierke 1 : 50 000 doplnených výškovými údajmi z iných zdrojov v horskom a rovinnom reliéfe. Vstupné údaje boli v niekoľkých etapách prekontrolované a upravené tak, aby sa minimalizoval prenos chýb do výsledku interpolácie. Samotnému výpočtu predchádzala séria testov na rôznych typoch reliéfu (nížinom, vysokohorskom, krasovom a pod.) s cieľom optimalizácie parametrov RST tak, aby sa zachovala hladkosť reliéfu (potrebná napr. na modelovanie procesov tečenia vody) a zároveň výrazné zmeny gradientu (na prechode z nížiny do pohoria, vo vysokohorskom reliéfe a pod.). Z dôvodu zachovania hodnôt významných výškových bodov (napr. vrcholov a sediel horských chrbtov) bolo pre jednotlivé typy vstupných výškových bodov zadané rôzne zhladzovanie (iné zhladzovanie pre vrstevnice ako pre výškové kóty).

Presnosť DMR dokumentujú rôzne štatistické ukazovatele, napr. odchýlky v zadaných bodoch alebo stredná kvadratická chyba (root mean square error, RMSE), ktorá hovorí o priemernej výškovvej chybe voči vstupným údajom. V prípade DMR25-SK dosahuje RMSE hodnoty 1,6 – 2,3 m podľa typu reliéfu (najväčšie odchýlky sú vo Vysokých Tatrách). DMR25-SK obsahuje rastrové údaje o nadmorskej výške, orientácii a sklone, pričom ich celkový objem je 1,46 GB. Pre aplikácie v mierke 1 : 500 000 a menších mierkach postačujú údaje s nižším priestorovým rozlíšením, a preto boli podobnou metodikou vytvorené DMR s rozlíšením 50 a 100 m a ich prevzorkovaním súbory s rozlíšením 200 a 500 m (obr. 2).

Environmentálne aplikácie

Spektrum využitia DMR v životnom prostredí je rozsiahle, zasahuje prakticky do všetkých prírodných, socioekonomických a technických disciplín, ktoré sa

zaoberajú štúdiom priestorových vzťahov v krajine. Väčšina aplikácií sa realizuje v prostredí GIS. DMR vstupuje do procesov mapovania, výskumu, územného plánovania, správy, rozhodovania a riadenia.

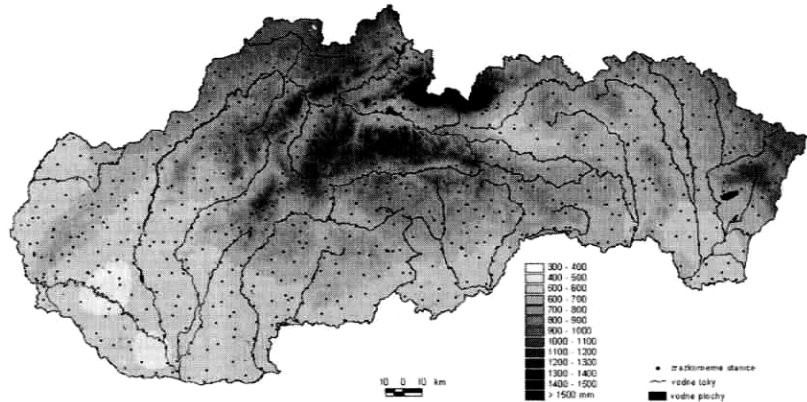
V jednoduchých úlohách sa údaje DMR využívajú len ako súčasť databázy na tvorbu dopytov, na jednoduché výbery podľa zadaných kritérií. Morfometrické ukazovatele reliéfu sa používajú v lokalizačných analýzach. Priestorové analýzy v GIS využívajú DMR pri hodnotení vplyvu reliéfu na usporiadanie iných prvkov, javov a procesov v krajine, hodnotení dostupnosti, viditeľnosti, bariérovitosti, vhodnosti, susedstva a pod.

Reliéf vstupuje aj do empirických a fyzikálnych modelov prúdenia, tečenia, oslnenia a šírenia. Nemenej významnú úlohu má pri vizualizácii údajov, ktorú možno zlepšiť tieňovaním tematických vrstiev alebo tvorbou 3D pohľadov, preletov nad územím a animáciami. DMR sa štandardne používa pri spracovaní údajov DPZ (pri ortorektifikácii a rádiometrickom vyrovnaní), ale aj v procese digitálnej klasifikácie. (Ďalšie informácie o DMR a jeho aplikáciách pozri Wilson, Gallant, 2002.)

Údaje DMR v databázovom prostredí GIS

Pre výskum odtokových pomerov bola spracovaná polygónová údajová vrstva malých povodí Slovenska v mierke 1 : 50 000, ktorej súčasťou je aj obsiahla atribútová databáza fyzickogeografických charakteristik. Z DMR Slovenska s rozlíšením rastra 50 m (DMR50-SK) boli pre jednotlivé povodia odvodené nasledujúce charakteristiky: maximálna, priemerná a minimálna nadmorská výška, rozdiel medzi maximálnou a minimálnou výškou, smerodajná odchýlka, maximálny a priemerný sklon a prevládajúca orientácia (Solín et al., 2001, obr. 3). Spolu s ďalšími charakteristikami sa tieto údaje využili na hydrogeografickú regionalizáciu povodí Slovenska a mapové vyjadrenie variability priemernej ročnej odtokovej výšky. Podobná databáza bola spracovaná pre potreby SHMÚ, pričom z digitálneho modelu reliéfu Slovenska DMR25-SK boli odvodené charakteristiky minimálnej, maximálnej a priemernej nadmorskej výšky povodí, nadmorskej výšky prameňov tokov a sklon hladiny tokov.

Údaje o nadmorskej výške strednej a východnej Európy s priestorovým rozlíšením rastra 1 km sú súčasťou databázy GIS prepojenej s internetovou aplikáciou na priestorové dopytovanie hodnôt slnečného žiarenia



4. Priemerný ročný úhm zrážok (1976 – 1995) vypočítaný viacrozmernou interpoláciou s použitím rastra nadmorskej výšky s rozlíšením 500 m

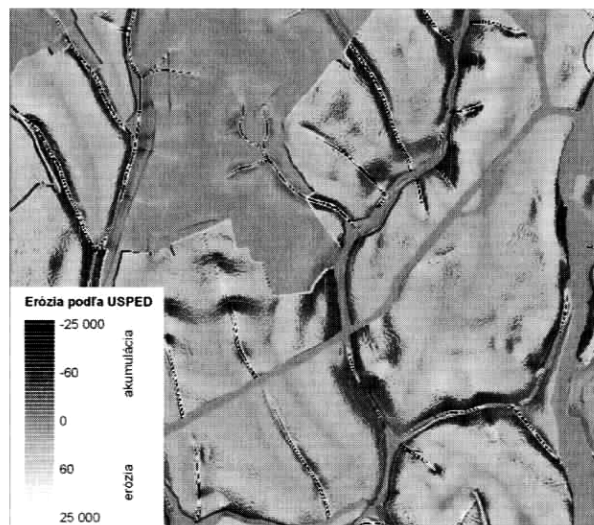
a jednoduchých výpočtov potenciálu výroby elektrickej energie fotovoltaickými zariadeniami (B).

Využitie DMR v priestorových analýzach

DMR50-SK sa použil na frekvenčnú analýzu výskytu tried krajinej pokrývky CORINE Land Cover vo vzťahu k trom morfometrickým ukazovateľom reliéfu (nadmorskej výške, sklonu a orientácii) na území Slovenska v mierke 1 : 100 000. Údajové vrstvy DMR a krajinej pokrývky boli vzájomne naložené a štatisticky vyhodnotené. Analýza doplnila súčasné poznanie vzťahu medzi reliéfom a krajinnou pokrývkou na celoštátnej úrovni použitím formalizovaných metodických postupov v prostredí GIS (Šúri, 2003).

DMR Slovenska s rozlíšením 500 m sa využil pri interpolácii priemerných hodnôt ročného úhrnu zrážok za obdobie 1976 – 1995, meraných na 795 zrážkomerných staniciach. Keďže medzi úhrnom zrážok a nadmorskou výškou existuje priestorovo podmienený korelačný vzťah, rastrová vrstva zrážok bola vytvorená viacrozmernou interpoláciou *s.vol.rst*, ktorá je implementovaná v GIS GRASS (Neteler, Mitasova, 2002). Táto metóda berie do úvahy nielen priestorovú polohu zrážkomerných staníc, ale aj ich nadmorskú výšku. Výber vhodných parametrov interpolácie sa uskutočnil metódou krížovej validácie (crossvalidation) tak, aby výsledný raster čo najvernejšie reprezentoval priebeh zrážkových polí pri dosiahnutí minimálnej odchýlky medzi nameranými a interpolovanými hodnotami v bodoch reprezentujúcich zrážkomerné stanice (obr. 4).

DMR25-SK sa využil v katastrálnych územiach obcí Svätý Jur a Liptovská Teplička (Štefunková, Cebecauer, 2002). Na plánovanie trás turistických chodníkov bola vytvorená aplikácia umožňujúca analyzovať viditeľnosť



5. Erózia a akumulácia modelovaná fyzikálnym modelom USPED v malom povodí

krajiny z navrhovaných trás. Pri hodnotení sa zohľadnili vlastnosti prvkov súčasnej krajiny (výška a vizuálna priepustnosť), identifikovali sa významné vyhladky a analyzovala sa aj celková viditeľnosť významných prvkov krajiny. Analýza viditeľnosti nad DMR je základom aj pre ďalšie aplikácie, napr. šírenie rádiových vln.

DMR a environmentálne modelovanie

Nároky na kvalitu údajov DMR používaných v environmentálnych modeloch sú najvyššie, keďže nedostatky v primárnych údajoch sa zásadne prenášajú do výsledkov modelovania. Na druhej strane teoretická informatika prináša nové efektívne algoritmy optimalizované na rýchle spracovanie veľkých objemov údajov. Príkladom je modul *r.terraflow* implementovaný v GIS GRASS (C), ktorý na základe DMR počíta hydrologické charakteristiky (napr. prispievajúce plochy, povodia). Vďaka použitiu veľmi efektívnych algoritmov umožňuje niekoľkonásobne rýchlejšie spracovanie DMR v porovnaní s podobnými metódami.

Náročnejšou aplikáciou DMR je napr. modelovanie eróznou-akumulačných procesov. V malých mierkach sa využívajú relatívne jednoduché prístupy na báze empirických modelov a generalizovaných údajov. Príkladom modelovania v regionálnej mierke je odhad potenciálnej a aktuálnej erózie pôd Slovenska, ktorý sme uskutočnili pomocou modelu USLE v prostredí GIS. Potenciálna erózia predstavuje maximálne možné ohrozenie územia vodnou eróziou za predpokladu, že sa neuvažuje

s ochranným účinkom vegetácie. Aktuálna erózia uvažuje s existujúcou vegetáciou v danom území. Model USLE bol modifikovaný tak, aby sa dali použiť údaje regionálnej mierky. Na odvodenie faktora reliéfu sa použil DMR50-SK, čo bolo postačujúce na spracovanie máp v mierke 1 : 500 000 a 1 : 1 mil. Obe mapy sú publikované v Atlase krajiny Slovenskej republiky (2002).

V detailných mierkach (1 : 10 000 a väčších) sa na erózne modelovanie zväčša používajú fyzikálne prístupy (USPED, LISEM a ďalšie), ktoré vyžadujú veľké množstvo vstupných parametrov. Presnosť DMR v nich zásadne ovplyvňuje simuláciu pohybu hmoty, a teda aj výsledky erózneho modelovania. Preto treba venovať pozornosť eliminácii umelých depresíí vygenerovaných interpolačnou funkciou tak, aby bola zabezpečená podmienka zachovania tečenia vody. Modelovanie, najmä na úrovni malého povodia, ukázalo, že ani mapy 1 : 10 000 dostatočne nereprezentujú reálne podmienky v teréne, a preto je vhodnejšie siahnuť po fotogrametricky alebo geodeticky nameraných údajoch. Obr. 5 dokumentuje použitie erózneho modelu USPED.

Reliéf významne určuje priestorovú a časovú distribúciu slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch. Modely na výpočet slnečného žiarenia integrované v prostredí GIS využívajú ukazovatele nadmorskej výšky, sklonu a orientácie nielen na výpočet intenzity, ale aj dynamiky tvorby tieňov, ktorá výrazne ovplyvňuje aktuálne i úhrnné hodnoty slnečného žiarenia, najmä v horskom reliéfe. Takéto údaje sú dôležité pre prírodné vedy (napr. ekológiu, klimatológiu, hydrológiu), ale aj pre technické aplikácie (DPZ, architektúru, fotovoltaiku a pod.).

V odhade dôsledkov priemyselných havárií, pri ktorých môže uniknúť veľký objem tekutín nebezpečných pre životné prostredie, sa simuluje tečenie látok na reliéfe s cieľom odhadnúť smer pohybu a rýchlosť tečenia látky, a teda aj ohrozenie pôdy, vegetácie, vodných tokov, zdrojov pitnej vody a pod.

Využitie DMR na vizualizáciu environmentálnych údajov

Špecifikom vyjadrovania reliéfu na mape je potreba znázorniť v dvojdimenzionálnom zobrazovacom priestore informácie, ktoré majú trojdimenzionálny (3D) charakter. Populárne sú prístupy využívajúce tieňovanie reliéfu i znázorňovanie javov na reliéfe formou blokdiagramov a multidimenzionálnych vizualizácií. V tieňovaných vizualizáciách sa dopĺňajú tematické údajové vrstvy informáciou o reliéfe, čím sa umožňuje ich interpretácia v priestorovom kontexte. Príklad vizualizácie krajiny pokrývky je uvedený na obr. 6. Viac informácií možno nájsť na internete (D).

DMR je významnou súčasťou environmentálnych aplikácií. Aby údaje o reliéfe vo forme DMR boli dostatočne spoľahlivé a spĺňali očakávaná, musí byť zabezpečená kvalita už vo fáze prípravy vstupných údajov, pri výbere rozlíšenia a interpolačnej metódy. Kvalitný DMR je základom úspešného použitia v environmentálnych analýzach a modelovaní, ktoré sú citlivé na prenos a znásobovanie chýb zo vstupných údajov. Pre analýzy v regionálnych mierkach (1 : 50 000 a menších) sú postačujúce v súčasnosti dostupné DMR celého Slovenska s rozlíšením 25 – 50 m. Pre detailnejšie analýzy a modelovania treba vytvoriť digitálne modely reliéfu s rozlíšením 1 – 10 m, ktoré vďaka ich presnosti lepšie zodpovedajú potrebám environmentálnej i technickej praxe.

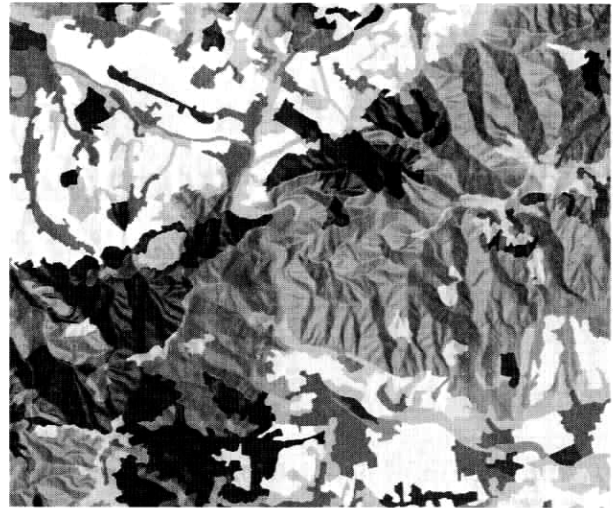
Súčasná technológia (najmä DPZ) sú schopné produkovať veľké objemy detailných geoúdajov v krátkych intervaloch. Preto rastie význam metód na ich rýchle a presné spracovanie. Poznanie prírodných katastrof (napr. záplav, požiarov), ako aj pomalšie prebiehajúcich negatívnych procesov (napr. globálnej zmeny klímy) podčiarkujú význam GIS, DPZ a DMR.

Z hľadiska podpory celospoločenského využitia takýchto údajov treba zvýšiť počet voľne dostupných environmentálnych databáz na internete. Príkladom môže byť informácia o záplavových mapách (E) alebo o "zdraví" povodia – obsahujúca údaje o kvalite vody, vzduchu, o skládkach nebezpečného odpadu, ale aj o ochranných zónach aktivítach (F).

Článok s farebnými obrázkami a ďalšími odkazmi je k dispozícii na internete (G).

Literatúra

- Mitas, L., Mitasova, H.: Spatial Interpolation. In: Longley, P., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., Rhind, D. W., (eds.): Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications, New York (Wiley), 1999, p. 481 – 492.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R.: Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. Hydrological Processes, 11, 1991, p. 47 – 54.
- Neteler, M., Mitasova, H.: Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Kluwer Academic Publishers Boston, 2002, 464 p.
- Solín, L., Cebecauer, T., Grešková, A., Šúri, M.: Small Basins of Slovakia and their Characteristics. Monografie Slovenského výboru pre hydrológiu, č. 6. Geografický ústav SAV, Slovenský výbor pre hydrológiu. Bratislava, 2001, 80 pp.
- Štefunková, D., Cebecauer, T.: Hodnotenie viditeľnosti z turistických chodníkov. Pracovný materiál ku grantovému projektu VEGA 2 200 822, 2002.



6. Vizualizácia krajinej pokrývky s využitím metódy tieňovaného reliéfu

Šúri, M.: Vplyv reliéfu na diferenciáciu krajinej pokrývky Slovenska. Geograf. Čas., 2003 (v tlači).

Wilson, J. P., Gallant, J.: Terrain Analysis; Principles and Applications, Wiley, New York, 2002, 479 p.

- (A) http://www.ing.unitn.it/~grass/conferences/GRA-SS2002/proceedings/pdfs/Cebecauer_Tomas.pdf
- (B) <http://iamest.jrc.it/pvgis/solradframe.php>
- (C) http://www.cz.duke.edu/~laura/papers/acm-gis01_terraflow.pdf
- (D) <http://www.geomodel.sk/research/hillshading/avk2002/cebecauer-avk2002-figs.pdf>
- (E) <http://www.ncfloodmaps.com>
- (F) <http://www.epa.gov/surf/>
- (G) <http://www.geomodel.sk/research/dtm/dtm-en-vi.htm>

RNDr. Marcel Šúri, CSc., Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava, GeoModel, spol. s r. o., Milana Marečka 3, 841 07 Bratislava
marcel.suri@savba.sk

Mgr. Tomáš Cebecauer, PhD., Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava, GeoModel, spol. s r. o.
tomas.cebecauer@savba.sk

Mgr. Jaroslav Hofierka, PhD., Katedra geografie a geológie Fakulty humanitných a prírodných vied Prešovskej univerzity, ul. 17. novembra 1, 081 16 Prešov, GeoModel, spol. s r. o.
hofierka@geomodel.sk