

RASTROVÉ DIGITÁLNE MODELY RELIÉFU A ICH APLIKAČNÉ MOŽNOSTI

Jaroslav HOFIERKA¹⁾, Marcel ŠÚRI^{1, 2)}, Tomáš CEBECAUER^{1, 2)}**Abstract**

Relief is an important component of landscape influencing natural processes as well as human economic activities. Therefore it is important to model geometric properties of relief using a digital model of relief. Creation and usage of digital models of relief become area of interest for many technically and natural-science oriented experts. In this paper we focus on problems regarding creation and use of raster-based digital models of relief with respect to the application side of the problem. We present technical as well as natural science examples.

Keywords: digital model of relief, geographic information system, interpolation.

Úvod

Reliéf je kontaktnou plochou medzi atmosférou, resp. hydrosférou a litosférou, resp. pedosférou. Jeho tvar je výslednicou rozlične pôsobiacich síl, pričom sám zároveň výrazne ovplyvňuje mnohé procesy a javy v krajine, ako aj aktivity ľudskej spoločnosti. Digitálny model reliéfu (DMR) predstavuje množinu priestorovo priradených údajov charakterizujúcich geometrické vlastnosti reliéfu (t.j. nadmorská výška reliéfu a iné morfometrické ukazovatele) vypočítaných na základe vstupných výškových bodov (údajov) a vhodnej interpolačnej metódy. Najmä v technickej praxi sa často používa názov digitálny model terénu (DMT), ktorý je však čiastočne významovo odlišným pojmom, pretože neobsahuje implicitne aj morfometrické ukazovatele reliéfu a niekedy sú do neho zahrňané aj technické prvky krajiny (napr. cesty).

Stav problematiky

Tvorba DMR, analýza geometrických vlastností reliéfu a ich fyzikálna interpretácia je na teoretickej úrovni dobre rozpracovaná v zahraničnej aj domácej literatúre (z množstva prác vyberáme napr. McCullagh 1988, Krcho 1990, Moore et al. 1991). Význam reliéfu v GIS aplikáciách podčiarkuje skutočnosť, že vo väčšine v súčasnosti dostupných GIS softvéroch existuje modul, ktorý je zameraný na tvorbu DMR. Ich kvalita je však rozdielna a ani ich správne použitie nie je triviálne, nakoľko vyžaduje odborné znalosti z problematiky modelovania reliéfu a jeho morfometrickej analýzy.

Najčastejšie používanými formami priestorovej reprezentácie DMR je pravidelná sieť (raster, grid) alebo nepravidelná trojuholníková sieť (triangulated irregular network, TIN). V *rastr*i sú topologické väzby medzi jednotlivými bodmi určené implicitne (polohou bodu v pravidelnej sieti), čo umožňuje veľmi jednoduchú reprezentáciu v počítači (dvojdimenziálne pole) ako aj jednoduché spracovanie. Naproti tomu v *TIN-e* topologické väzby medzi bodmi pri nepravidelnej reprezentácii DMR sú vyjadrené explicitne (trojuholníková sieť

Mgr. Jaroslav HOFIERKA, PhD., RNDr. Marcel ŠÚRI, Mgr. Tomáš CEBECAUER

¹⁾ GeoModel, s.r.o., M. Marečka 3, 841 07 Bratislava,
e-mail: hofierka@netlab.sk, info@geomodel.sk, http://www.geomodel.sk

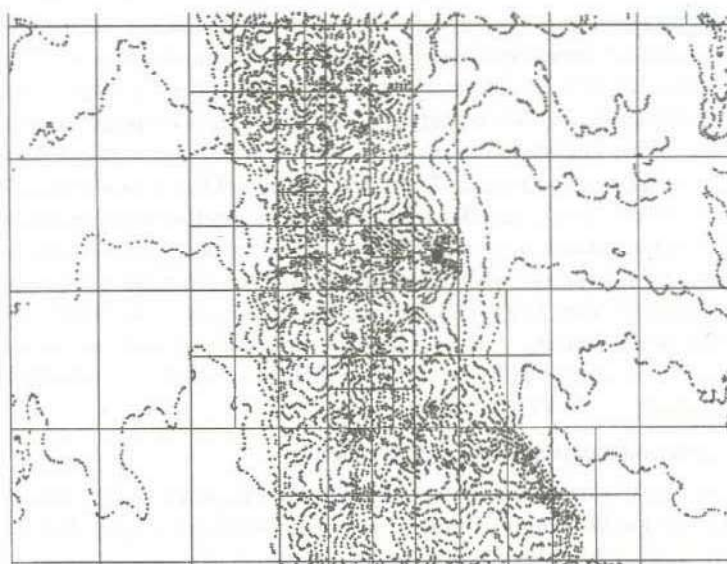
²⁾ Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava, suri@savba.sk, cebecauer@savba.sk

spájajúca susedné body), čo sa prejavuje v zložitejšej reprezentácii a spracovaní. Na druhej strane rastrový údajový formát vyžaduje pri vyjadrovaní zložitejších tvarov reliéfu podstatne väčší počet bodov ako TIN, čo však pri rýchlom zvyšovaní výkonu počítačov už nie je vážny problém. Environmentálne aplikácie kladú väčší dôraz na možnosti spracovania DMR, a preto sa v tejto oblasti viac presadzuje používanie rastra. V technickej praxi sa dôraz kladie na presnosť a vyjadrenie detailov najmä v kombinácii s technickými prvkami na reliéfe (projektovanie stavieb). DMR sa tu, aj na základe určitej tradície častejšie vyjadruje pomocou TIN-u. Presnosť DMR vypočítaného na základe TIN-u na hladkom reliéfe je však často sporná, čo sa prejavuje najmä pri odvodených morfometrických ukazovateľoch ako sú sklony, orientácie, krivosti a podobne (Desmet 1997). Takisto priestorové jednotky tohto DMR založeného na TIN-e predstavujú trojuholníky s veľmi rozdielnou veľkosťou (sú podmienené počtom a rozložením vstupného bodového poľa) čo sťažuje použitie pri modelovaní prírodných procesov na báze teórie spojitých fyzikálnych polí.

Tvorba rastrového digitálneho modelu reliéfu

Samotná tvorba DMR pozostáva z viacerých krokov. Prvým krokom je získanie a kontrola vstupných údajov. *Kvalita vstupných údajov* je jedným z kľúčových faktorov tvorby dobrého DMR. Vstupné údaje môžu byť získané z rôznych zdrojov – napríklad vektorizáciou vrstevníc z máp, fotogrametricky, geodeticky, prípadne pomocou GPS. Každá z týchto metód ponúka určitú presnosť vstupných údajov, čo je potrebné zohľadniť pri výpočte a použití DMR. Pri tvorbe DMR stredných a malých mierok (1:10 000 a menších) sa najčastejšie používa vektorová digitalizácia vrstevníc z máp rôznych mierok. Reliéf zobrazený v mape určitej mierky je generalizáciou reálneho povrchu v rozsahu, ktorý je podľa nášho názoru nedostatočne kvantitatívne zdokumentovaný. Priestorové rozloženie získaných vstupných údajov je zväčša nepravdivé (prehustenie údajov pozdĺž vrstevnice a podhustenie v priestore medzi vrstevnicami), niekedy až extrémne nerovnomerné (najmä v rovinných oblastiach), čo následne zvyšuje nároky na kvalitu použitej interpolačnej metódy (Obr. 1). Počet vstupných bodov sa môže pohybovať rádovo od niekoľko desiatok až po niekoľko miliónov.

Z teoreticko-metodologického hľadiska je *interpolácia* najnáročnejšia časť problému. Analýzou dostupnej literatúry, ako aj vlastným výskumom sme zistili, že skupina interpolačných metód nazývaných *globálne bazové splajny* majú v tomto smere najlepšie výsledky. Majú rad vlastností (napr. diferencovateľnosť, flexibilita, lokálne správanie, segmentovateľnosť spracovania), ktoré im umožňujú dosahovať vysokú kvalitu interpolácie a spracovanie neobmedzeného počtu vstupných údajov a to aj na platforme osobných počítačov. Tieto vlastnosti dokonca umožňujú eliminovať niektoré nedostatky pôvodných vstupných údajov resamplovaním s použitím parametrov tenzie a zhladzovania tak, aby z nich opätovne vypočítaný DMR bol akceptovateľný pre požadované aplikácie. Z týchto dôvodov pri tvorbe DMR využívame *regularizovaný splajn s tenziou* kontrolovaný parametrami tenzie a zhladzovania s možnosťou priameho výpočtu morfometrických ukazovateľov reliéfu. Táto funkcia je implementovaná v GIS-e GRASS ako príkaz *s.surf.tps*. Vlastnosti funkcie a niektoré aspekty jej počítačovej implementácie sú opísané v prácach (Mitáš a Mitášová 1988, Mitášová a Mitáš 1993). Presnosť interpolácie pomocou tejto metódy je dokumentovaná v Tab. 1.



Obr. 1. Vstupné údaje (vektORIZOVANÉ vrstevnice zo ZM 1:50 000) a ich segmentácia pri interpolácii

Fig. 1. Input data (vectorised contours from base maps in scale 1:50 000) and their interpolation segmentation

Tab. 1. Porovnanie presnosti niektorých 2D interpolačných metód podľa Mitáša a Mitášovej (1988)

Tab. 1. An accuracy comparison of some 2D interpolation methods by Mitáš and Mitášová, 1988

Metóda	Stredná chyba	Max. chyba
Akima Mod. Δ	0.00729	0.0520
Mod. quadr. Shepard	0.00785	0.0573
Lawson Δ	0.00783	0.0951
Renka global Δ	0.00540	0.0499
Renka local Δ	0.00619	0.0505
Nielson-Franke quadr.	0.00741	0.0782
Nielson min. norm Δ	0.00537	0.0492
Splajn tenkej platne	0.00497	0.0470
Kompl. reg. splajn $\phi = 10$	0.00290	0.0280
Kompl. reg. splajn $\phi = 13$	0.00158	0.0168
Kompl. reg. splajn $\phi = 20$	0.03230	0.0301

Δ – metóda na báze trojuholníkovej siete

Z hľadiska použitia DMR je tiež dôležitý výber optimálneho *priestorového rozlíšenia* výsledných rastrov. Priestorové rozlíšenie je určené veľkosťou hrany bunky (pixla) rastra. Toto rozlíšenie závisí od kvality vstupných údajov, ako aj od cieľov použitia v GIS projekte. Priestorové rozlíšenie sa pohybuje od 1-2 metrov pri aplikáciách vo veľkých mierkach až po niekoľko desiatok až stoviek metrov pri globálnejších aplikáciách v malých mierkach. Výber priestorového rozlíšenia je závislý nielen od mierky, ale aj od kvality vstupných bodov a informačnej hustoty v priestore.

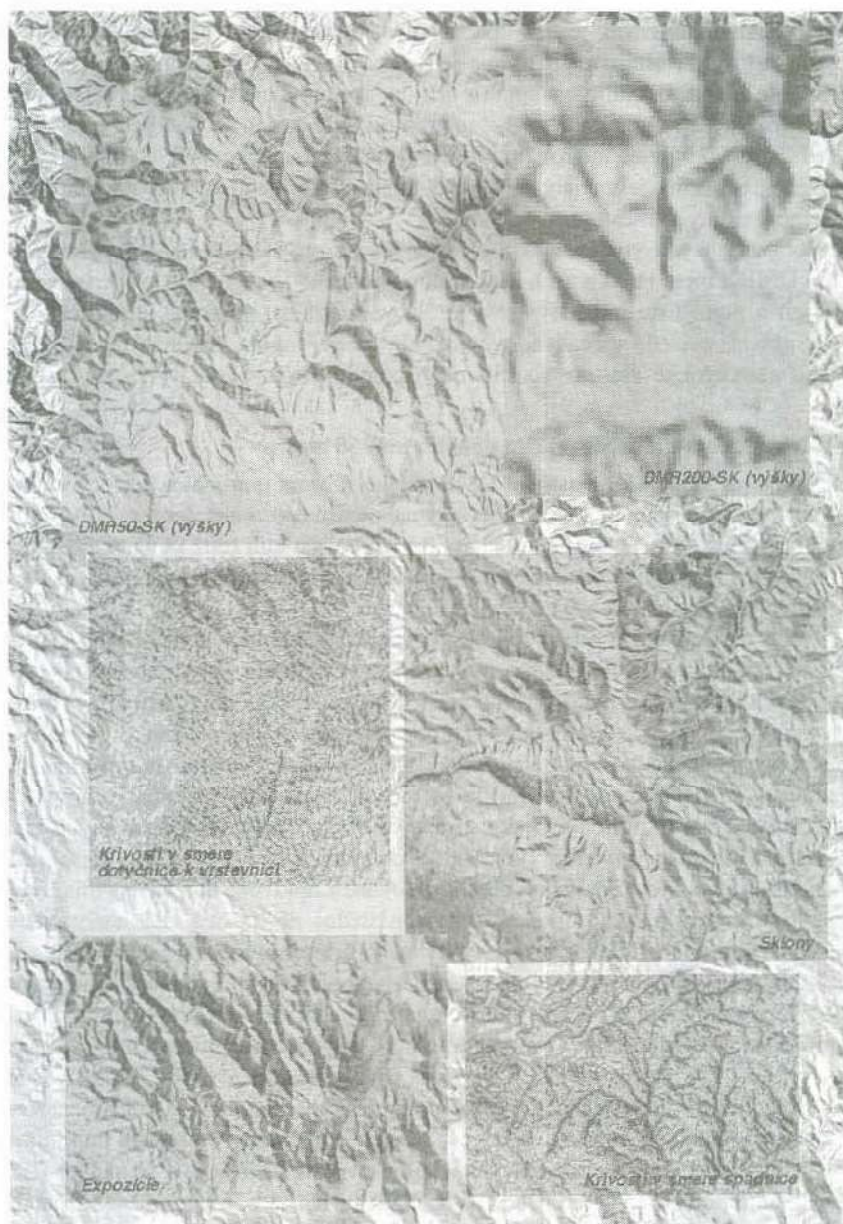
Percepciu údajových vrstiev v GIS-e je možné už pri 2D vizualizácii výrazne zlepšiť s využitím DMR a metód tieňovania, nastavením vhodného „osvetlenia“, výberom a interpoláciou farieb a pod.. Ešte impresívnejšia je 3D vizualizácia, prípadne animácia – let nad krajinou. Správne zvolená vizualizácia umožňuje lepšie vnímať členitosť reliéfu, dávať do súvisu jeho geometrické vlastnosti s inými prírodnými a človekom vytvorenými prvkami v krajine.

Digitálny model reliéfu Slovenska s rozlíšením 50 metrov

Donedávna na Slovensku existoval DMR celého územia minimálne v troch variantoch. Ich praktické využitie však naráža na problémy nekonzistencie a nejednotnosti kvality vstupných údajov a použitých metód interpolácie. Pri ich tvorbe boli totiž použité viaceré zdroje údajov s nejasnou kvalitou a rôzne metódy interpolácie a výpočtu morfometrických ukazovateľov na jednotlivých segmentoch (Šúri et al., 1997).

Pri tvorbe digitálneho modelu reliéfu Slovenskej republiky s rozlíšením 50 metrov (DMR50-SK) sme vychádzali z analýzy možností jeho nasadenia, existencie a kvality dostupných vstupných údajov, dostupnosti a vhodnosti interpolačných metód, ako aj z požadovanej kvality výstupov – predovšetkým z hľadiska priestorového rozlíšenia (mierky spracovania), pri mapových výstupoch aj z požadovanej prezentačnej kvality. To všetko bolo optimalizované aj s ohľadom na finančné, kapacitné a ľudské zdroje vyčlenené na túto úlohu. Vstupný údajový súbor pozostáva z cca 16 miliónov bodov získaných spracovaním vektorizovaných vrstevníc zo 137 základných máp v mierke 1:50 000 poskytnutých Geodetickým a kartografickým ústavom v Bratislave. Tieto údaje boli prekontrolované a upravené tak, aby sa minimalizoval prenos chýb primárnych údajov do výsledku a následne do ďalších GIS analýz. Kontrola a úprava spočívala v identifikácii a oprave chybného priebehu vrstevníc a priradenia výškového atribútu. Na rovinnom území s nedostatkom vrstevníc boli doplnené ďalšie doplnkové vrstevnice. Pred samotným výpočtom bolo potrebné vykonať rad prípravných prác zameraných na určenie hodnôt interpolačných parametrov, ako aj spôsoby segmentácie celého územia. Samotný výpočet bol realizovaný na počítačoch triedy Pentium v GIS-e GRASS. Súčasťou DMR50-SK sú rastre nadmorských výšok, orientácií voči svetovým stranám, normálová krivosť v smere spádnice a normálová krivosť v smere dotýčnice k vrstevnici definujúce tvar reliéfu v danom bode. Ukážky jednotlivých údajových častí DMR50-SK sú na Obr. 2.

O kvalite interpolácie a vytvoreného DMR50-SK svedčí aj to, že napríklad bežne na tento účel používaný štatistický ukazovateľ RMSE (hovorí o priemernej výškovej chybe interpolácie oproti zdroju údajov) dosahuje hodnoty v intervale 2.1-2.7 metrov podľa typu reliéfu, pri DMR100-SK sme dosiahli hodnotu 4.2-5.1 metrov. Na porovnanie, americký USGS DEM s horizontálnym rozlíšením 30 metrov dosahuje hodnoty RMSE okolo 7 metrov s maximálnymi hodnotami až 15 metrov.



Obr. 2. Ukážky údajových súborov DMR50-SK a DMR200-SK pre oblasť Poľany a stredného Pohronia

Fig. 2. Examples of DMR50-SK and DMR200-SK datasets for Polana and central Považie region

Jedným z vedľajších výstupov prác na DMR50-SK bolo teda aj vytvorenie kvalitnejšieho DMR100-SK v porovnaní s dosiaľ u nás existujúcimi DMR tohto typu. Vhodným prevzorovaním s použitím zhladzovania sme z DMR50-SK vytvorili aj údaje s menším rozlíšením (napr. DMR200-SK, DMR500-SK a pod.). Tieto digitálne modely reliéfu sú k dispozícii vo väčšine bežne používaných rastrových formátoch v súradnicovom systéme S-JTSK a v prípade potreby aj v súradnicovom systéme S-42.

Lokálne digitálne modely reliéfu s detailnejším rozlíšením

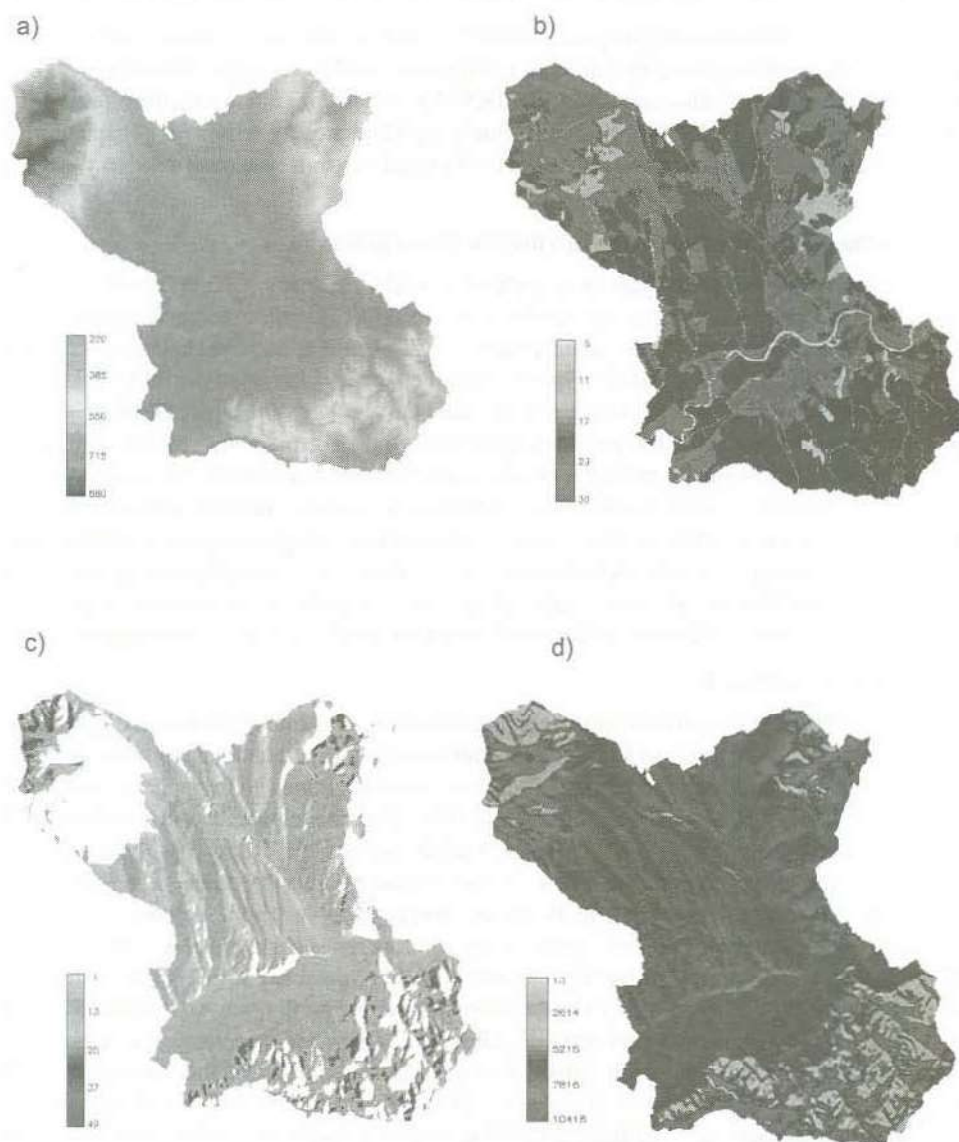
Dostupnosť skenovaných tlačových podkladov základnej mapy 1:10 000 celého územia Slovenska je predpokladom pre tvorbu detailnejších DMR, kvalitou zodpovedajúcich tejto mierke. Okrem toho sú často pre niektoré územia k dispozícii aj mapové diela s výškopisom vo väčšej mierke. Vstupné údaje do výpočtu možno tak opäť získať relatívne ľahko vektorizáciou výškopisu. Avšak v prípade potreby dosiahnutia vysokých presností DMR je vhodné použiť vstupné údaje získané fotogrametrickými metódami alebo meraním v teréne. Z hľadiska týchto mierok spracovania sa spravidla využívajú rastrové údajové formáty s rozlíšením bunky rastra 2-20 metrov. Takéto rozlíšenie už umožňuje modelovať niektoré prírodné procesy v krajine (povrchový odtok zrážok, eróziu a akumuláciu, evapotranspiráciu, zamokrenie, priebeh povodňovej vlny, tok znečisťujúcich látok a pod.). V technickej praxi je nad DMR s uvedeným rozlíšením vytvorený celý rad aplikácií na podporu projektovania, prípadne podkladov pre presné modelovanie šírenia telekomunikačného signálu v intraviláne miest.

Aplikačné možnosti

Použitie DMR je zaujímavé najmä v environmentálnej a technickej oblasti. DMR je možné využiť všade tam, kde reliéf so svojimi charakteristikami vstupuje do analytického, modelovacieho alebo rozhodovacieho procesu. V oblasti prírodných vied to je napr. hydrologické, meteorologické, resp. klimatické modelovanie (Obr. 3) a modelovanie geomorfologických procesov alebo analýza geomorfologických štruktúr (pozri napr. Dikau 1989, Moore et al. 1991). Z technických disciplín je DMR vhodný najmä pre potreby riadenia a plánovania, napríklad v oblasti projektových príprav stavieb, analýzy vplyvu reliéfu na pokrytie a kvalitu šíreného rádiatelekomunikačného signálu (Obr. 4), dopravnej dostupnosti a v obrane štátu. DMR je prínosom i v oblasti tvorby národnej digitálnej databázy a jej možnej integrácie v rámci nadnárodných databáz. Vo všeobecnosti stúpa dopyt po digitálnych modeloch reliéfu aj v súvislosti s nárastom využívania digitálnych údajov DPZ (satelitných a leteckých). Ako príklad je možné uviesť ich aplikáciu v metódach geometrických a rádiometrických korekcií alebo v procese analýzy digitálnych obrazových záznamov DPZ a ich klasifikácie. V súvislosti s elegantnou vizualizáciou DMR je možné aj reklamné využitie, pretože okrem informačnej hodnoty môže nadobúdať aj hodnotu umeleckú.

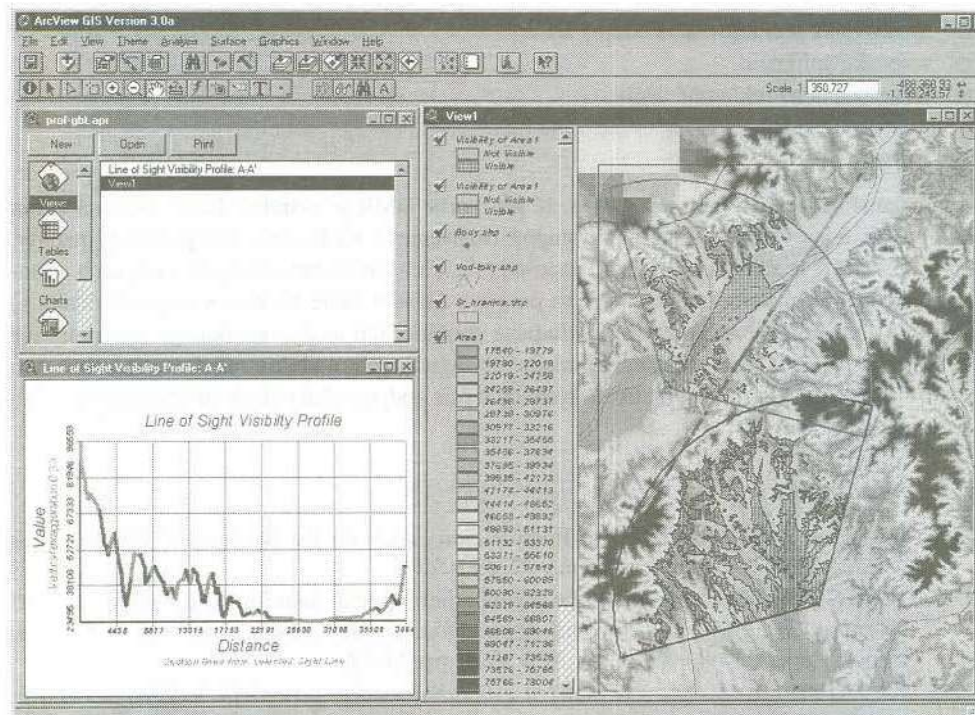
Prírodovedné a environmentálne aplikácie

- geologické a geomorfologické štruktúry a procesy
- hydrologické, klimatické a meteorologické javy a procesy
- pôdne mapovanie a procesy
- lesné a nelesné ekosystémy



Obr. 3. Oslnenie oblasti Žiarskej kotliny s vplyvom zatienenia okolitým reliéfom: a) reliéf (m), b) albedo (odrazivosť povrchu), c) uhol dopadu lúčov 21. júna o 19.00 hod (v stupňoch; nulové hodnoty reprezentujú oblasti v tieni), d) príkon priameho slnečného žiarenia za celý deň (Wh/m^2) pre 21. marec

Fig. 3. Illumination of Žiarska kotlina region with shadowing influence of surrounding relief a) elevation, b) albedo, c) solar illumination angle for June 21 at 7 p.m. in degrees, white areas are shadowed, d) solar irradiance for March 21 in Wh/m^2



Obr. 4 Analýza šírenia telekomunikačného signálu z rôzne umiestnených vysielateľov v oblasti stredného Považia v prostredí ArcViewGIS3.0

Fig. 4. Analysis of telecommunication signal spreading from various positioned transmitters for central Považie region within ArcViewGIS 3.0 software environment

- šírenie bodového a plošného znečistenia, jeho predikcia a sanácia
- ohrozenie extrémnymi javmi a procesmi (napr. záplavy, erózia, zamokrenie)
- spracovanie ekologickej dokumentácie (napr. ÚSES a EIA) hodnotiacich stav životného prostredia a vážnosť ekologických hrozieb
- príkon priameho slnečného žiarenia na reliéf

Technické a ďalšie aplikácie

- projekčná príprava stavieb všetkého druhu
- územné plánovanie
- správa majetku (líniové a plošné stavby väčšieho územného rozsahu)
- správa územia (mestské a regionálne informačné systémy)
- dostupnosť a kvalita šíreného rádiového signálu
- riadenie a plánovanie letovej premávky
- plánovanie cestnej prepravy
- dostupnosť, bariérovitosť, viditeľnosť a pod.

- spracovanie a interpretácia údajov DPZ
- vojenské aplikácie
- vizualizácia na reklamné účely

Záver

Získané skúsenosti nám naznačujú, že pri tvorbe DMR je potrebné klásť dôraz na výber vstupných údajov s ohľadom na výstupné rozlíšenie a na kvalitu interpolačnej metódy. Kvalitný DMR je základom pre jeho úspešné použitie v environmentálnych analýzach a modelovaní (ktoré sú mimoriadne citlivé na prenos a znásobovanie chýb vo vstupných údajoch) ako aj v technických aplikáciách. Z hľadiska detailnejších analýz sa ukazuje ako potrebné vytvorenie celoštátnych, prípadne aj lokálnych digitálnych modelov reliéfu s podrobnejším rozlíšením (napr. 20 a menej metrov), ktoré by lepšie zodpovedali potrebám environmentálnej a technickej praxe.

Literatúra:

- DESMET, P. J. J. (1997): Effects of Interpolation Errors on the Analysis of DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 563-580.
- DIKAU, R. (1989): The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: *Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, (ed. J. Raper), Taylor&Francis, New York, pp. 51-77.
- KRCHO, J. (1990): *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. VEDA, Bratislava, 1990, 432 s.
- MCCULLAGH, M. J. (1988): Terrain and Surface Modelling Systems: Theory and Practice. *Photogrammetric Record* 12, pp. 747-779.
- MITÁŠ, L., MITÁŠOVÁ, H. (1988): General Variational Approach to the Interpolation Problem. *Comp. Math. Appl.* 16, pp. 983-992.
- MITÁŠOVÁ, H., MITÁŠ, L. (1993): Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation. *Mathematical Geology*, 25, 641-657.
- MOORE, I. D., GRAYSON, R. B., LADSON, A. R. (1991): Digital Terrain Modelling: a Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 11, 47-54.
- ŠÚRI, M., CEBECAUER, T., HOFIERKA, J. (1997): Tvorba digitálneho modelu reliéfu Slovenskej republiky. *Geodetický a kartografický obzor*, 43, 12, 257-262.

RASTER-BASED DIGITAL MODELS OF RELIEF AND THEIR APPLICABILITY

Jaroslav HOFIERKA, Marcel ŠÚRI, Tomáš CEBECAUER

Summary

Digital model of relief (DMR) presents a set of spatially georeferenced data characterising geometric properties of relief (i.e. elevation and other morphometric indices) computed using elevation input data and an appropriate interpolation method.

A creation of DMR consists of several steps: capturing and controlling of input data with the emphasis on a quality and properties of the Regularized Spline with Tension (used interpolation method) – (Tab. 1), a spatial resolution of output rasters and visualization.

The digital model of relief of the Slovak republic with a spatial resolution of 50 meters (DMR50-SK) was created from digitised contours using 137 base topographic maps in scale 1:50 000. The DMR50-SK consists of data files with elevation, exposition and normal curvatures rasters. The examples are given on Obr. 2. The quality of DMR50-SK is expressed by RMSE error, which is within 4.2-5.1 meter range.

Local DMRs (2-20 meters spatial resolution) can be analogically computed using available data sources (topographic maps, fotogrammetric and geodetic measurements).

Applications of DMRs are in natural and technical areas. For example, DMRs can be effectively used in hydrological, geomorphological and climatic applications (Obr. 3), an analysis of telecommunication signal spreading (Obr. 4) or remote sensing applications.

Recenzent: Doc. RNDr. Ján Feranec, CSc.

VÝVOJ DIGITÁLNYCH MODELOV A ICH VYUŽITIE PRI ZOBRAZOVANÍ ENDOKRASOVÝCH FORIEM

Zdenko HOCHMUTH

Abstract

Mapping and picturing of endokarst forms (caves) had profiled into specialised branch of cartography called speleocartography. In our work we give an outline of development of digital models of caves and of newest trends pointing towards their space picturing in both Slovak and international context.

Key words: cave mapping, axonometry, vertical isolines

Úvod

Mapovanie a zobrazovanie endokrasových foriem – jaskýň sa dávnejšie profilovalo na špecializované odvetvie kartografie – speleokartografiu. Jej hlavným špecifikom je skutočnosť, že jaskynné priestory sa nachádzajú pod povrchom a sú zväčša tak zložitého tvaru, že nie je možné ich jednoduchým spôsobom vnímať, ako napr. tvary povrchové, kde napr. letecký snímok prakticky predstavuje mapu. Zobrazujeme nie rovinnú, prípadne zakrivenú plochu, ale skôr akési negatívne „teleso“, kde je možné využiť i poznatky z technického kreslenia a nevyjadrovať sa iba pôdorysom, ale aj pohľadom z obecného smeru (3D) – axonometriou. Mapovanie jaskýň sa približuje problematike banského merania, kde je však akcent položený skôr na presnosť vyžadovanú praxou a tvar priestorov, zväčša pravidelnejší, ako v jaskyniach, nie je tak dôležitý. Pri mapovaní či zameriavaní jaskýň sa využívali špecifické postupy, ich vyhodnocovanie bolo však limitované prácnosťou matematického spracovania. Široké rozšírenie výpočtovej techniky sa prejavilo aj v speleokartografii zrýchlením výpočtov i umožnenie takých manipulácií (hlavne v 3D zobrazení), ktoré doposiaľ boli realizované iba výnimočne.

Doc. RNDr. Zdenko HOCHMUTH, CSc.

Katedra geografie, Prírodovedecká fakulta Univerzity P.J. Šafárika v Košiciach, Jesenná 5, 041 54 Košice