

TÉMATICKÉ MAPY ZALOŽENÉ NA DIGITÁLNÍM MODELU RELIÉFU

JAROMÍR KOLEJKA*, DAVID KÁŇA**, VLADIMÍR PLŠEK**, MARTIN KLIMÁNEK***,
VLADISLAV NAVRÁTIL****, JAROSLAV SVOBODA*****

Jaromír Kolejka, David Káňa, Vladimír Plšek, Martin Klimánek, Vladislav Navrátil, Jaroslav Svoboda: Thematic maps derived from digital elevation model. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 9, 2009, 2, 11 figs., 3 tabs., 13 refs.

DEM represents an important data source for various thematic maps useful for the scientific and applied landscape research. There are the traditional DEM derivatives as shadowed map, elevation (hypsometric) map, slope and aspect maps presented in the paper. More advanced maps as outputs of hydrological and soil erosion modeling are demonstrated. Other maps interesting from the geography viewpoint as the map of relief energy, terrain ventilation, energy of unitary water course, wind field model and the temperature field model extrapolated from climatic station data are added. Some suggestions for DEM derivatives application are discussed.

Key words: DEM derivatives, hypsometry, slope, aspect, relief energy, run-off model, soil erosion model, terrain ventilation, energy of unitary water course, wind speed and direction field, temperature field model

ÚVOD

Neustálé zdokonalování digitální snímací techniky umožňuje pořizování velmi kvalitních, spolehlivých a detailních modelů zemského povrchu. Radarová a laserová snímací technika je zdrojem dat, jejichž rozlišovací schopnost v závislosti na rozměrech snímaného území a účelu snímání dosahuje i subcentimetrových hodnot. Jiná situace je u pokryvných snímání rozsáhlejších území, kde poměr ceny a efektivity je klíčovou veličinou. Zatímco laserové snímání lze efektivně aplikovat na plochy o rozměrech řádově maximálně několika hektarů při současných cenách a zpracovatelské kapacitě výpočetní techniky, radarové snímání z leteckých a případně družicových nosičů je vhodné pro rozlohy až tisíců kilometrů čtverečných, i když v tomto případě obvykle s rostoucími rozměry území klesá výšková přesnost a spolehlivost záznamů. Vhodným kompromisem zabezpečujícím dostatečnou kvalitu výsledného modelu terénu je digitální fotogrammetrické vyhodnocení analogových nebo digitálních leteckých snímků. Digitální model terénu pořízený moderními aerofoto-

grammetrickými technologiemi se vyznačuje oproti dřívějším podkladům o reliéfu výrazně vyšší podrobností, která měřitelná velikostí jednoho obrazového pixelu (řádově v dm), přičemž výšková přesnost je obvykle v rozsahu několika dm až cm. Pro pokrytí národního území je taková přesnost dostačující a umožňuje všestranné zpracování a vyhodnocení těchto geodat.

V současnosti je pro území České republiky k dispozici řada digitálních modelů terénu (DMT) vyznačujících se různou podrobností, původem a účelem. Na jejich tvorbě se podílejí jak státní, tak soukromé organizace. Jeden z nejkvalitnějších DMT z produkce společnosti Geodis Brno dosahuje kolem 10 m pro území celé ČR s výškovou přesností kolem 1 m (viz www.geodis.cz). O něco „hrubší“ DMT vykazují velikosti pixelů kolem 25 m. Volně dostupné na internetu jsou DMT ČR s pixelem o hraně 100 m. Tyto materiály představují vhodný datový základ pro rozmanité experimenty, které slouží k výpočtům tradičních i prozatím neobvyklých charakteristik terénu, případně dalších proměnných bezprostředně souvisejících s parametry reliéfu. Kapacitní vý-

* Ústav geoniky AV ČR, Ostrava, pobočka Brno, Drobného 28, 602 00 Brno, Czech Republic, e-mail: kolejka@geonika.cz,

** GEODIS BRNO, Lazaretní 11, Židenice, 602 00 Brno, Czech Republic, e-mail: vplsek@geodis.cz, dkana@geodis.cz,

*** Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1/1665, 613 00 Brno, Czech Republic, e-mail: klimanek@mendelu.cz,

**** Masarykova univerzita v Brně, Kotlářská 21, 601 00 Brno, Czech Republic, e-mail: navratil@ped.muni.cz,

***** Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Boční 1401/2, 14100 Praha 4, Czech Republic, e-mail: svoboda@ufa.cas.cz

početní technika a výkonné nástroje umožňují účelné vyhodnocení rozsáhlých datových souborů, jakými bezesporu digitální modely terénu jsou. Zde je vhodné připomenout, že vedle DMT, resp. digitálních modelů reliéfu, jsou k dispozici i digitální modely povrchu, které zachycují také objekty nad pevným zemským povrchem, ať již přírodním nebo konstruovaným. Laserové a radarové snímáči technologie primárně umožňují vytvářet právě tyto digitální modely povrchu. DMT je nutno z nich odvodit.

PODSTATA A TŘÍDĚNÍ DIGITÁLNÍCH MODELŮ TERÉNU

Digitální modely terénu jsou používány v geoinformatické zhruba od roku 1950 (MILLER a LAFLAMME 1958). Od této doby se staly nedílnou součástí digitálního zpracování prostorových geografických informací. V aplikacích GIS poskytují příležitosti pro modelování, analyzování a zobrazování úkazů souvisejících s topografií a reliéfem.

Zdrojová (terénní) data představují relativně neuspořádané datové prvky (ojedinělé hodnoty). Pro vytvoření DMT je nutné zavést mezi těmito prvky nezbytné topologické vztahy, stejně tak jako interpolovat tato prostorová data do souvislého povrchu s definovaným chováním.

Techniky terénního modelování mohou být klasifikovány podle těchto kritérií:

- datová struktura – základní a nejčastější rozdělení je na popis povrchu pomocí rastrových modelů s různým typem pixelů nebo facet, anebo popis pomocí triangulační sítě,
- matematický model – obvyklé je rozdělení podle způsobů popisu povrchu mezi fasetami, v podstatě jde o způsob interpolace hodnot povrchu,
- způsob generování modelu – základní rozdělení vychází z předpokladu automatického generování hodnot (při možnosti nastavení parametrů, případně filtrování hodnot) nebo možnosti poloautomatického zpracování se zásahem operátora (vkládání povinných spojnic apod.); tyto procedury pak mohou mít lokální nebo globální charakter.

Z hlediska datových reprezentací můžeme v podstatě hovořit o třech typech modelů:

- Rastrový model, který je chápán ve dvou variantách – první považuje buňku (pixel) za plošku (fasetu) uzavřenou čtyřmi body rastrové sítě, z nichž každý může mít jinou výšku (grid), a výsledný model je tak tvořen zborcenými čtyřúhelníky. Druhá pokládá buňku (pixel) za objekt reprezentující pravouhloú plošku integrálně a přiřazená hod-

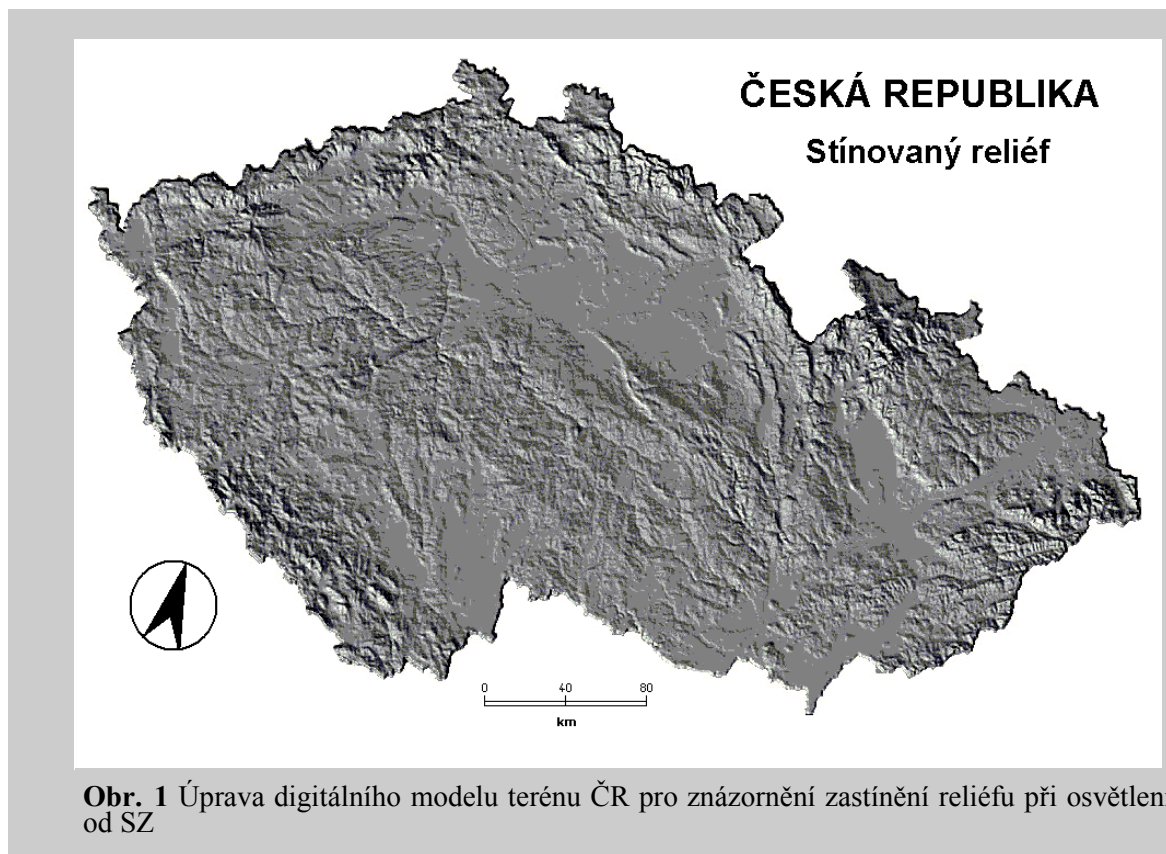
nota reprezentuje atribut výšky pro celou plochu buňky (pixelu) – tato varianta se používá v rastrově orientovaných GIS nejčastěji (KRAUS 2000).

- Polyedrický model, u kterého jsou elementárními ploškami trojúhelníky, které k sobě přiléhají a tvoří tak mnohostěn, přimykající se k terénu. Vrcholy mnohostěnu jsou body na terénní ploše a interpolace plochy se obvykle provádí lineárně po trojúhelnících. Tento přístup, označovaný jako triangulace či nepravidelná trojúhelníková síť, v originále Triangulated Irregular Network (TIN), je v současné době u vektorově orientovaných GIS nejrozšířenější. V některých případech však nejsou z hlediska přesnosti rovinné trojúhelníky dostačujícím řešením a jejich povrch může být modelován pomocí specifických algoritmů jako jsou například Bezierův plát (PFEIFER a POTTMANN 1996) nebo Coonsova plocha.
- Plátový model má mnoho rysů společných s modelem polyedrickým. Terén je opět rozdělen na menší plošky, které však nemusí být pouze rovinné, mohou být i jistým způsobem zakřivené. Nejčastěji se používají plochy popsitelné polynomickými funkcemi, které na sebe při hraničních liniích navazují natolik hladce, aby byla zaručena spojitost derivací do jistého, předem daného řádu.

TRADIČNÍ ODVOZENINY DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU A JEJICH VYUŽITÍ KE STUDIU RELIÉFU

STÍNOVÁNÍ RELIÉFU

DMT umožňují vytváření realistického zastínění terénu. Jisté zjednodušení pro omezená území, např. celé území ČR, představuje zanedbání zakřivenosti zemského povrchu. Většina komerčních i freeware GIS programů obsahuje nástroje pro modelování zastínění. Úkolem uživatele je stanovení geografické polohy – směru a výšky – úhlu zdroje osvětlení terénu. Procedura pak podle těchto údajů na základě porovnávání hodnot pixelů v DMT spočítá intenzitu zastínění (resp. oslunění) v jednotlivých pixelech modelu a zobrazí je v odstínech zvolené barvy či v barevné škále generované automaticky, nebo na základě výběru uživatele z nabídky, případně ve stupnici vytvořené přímo uživatelem. V kartografické tvorbě je běžné používání osvětlení od SZ (ačkoliv odtud běžné oslunění v našich zeměpisných šířkách nepřichází) navozující dojem čtení mapy při příchodu světla zepředu zleva.



Obr. 1 Úprava digitálního modelu terénu ČR pro znázornění zastínění reliéfu při osvětlení od SZ

Vzhledem k tomu, že osvětlení reliéfu, a tím také jeho zastínění, lze měnit při práci s PC v reálném čase, lze experimentovat se směry a výškou zdroje světla účelově tak, až lze získat optimální (pro daný účel) obraz poskytující doposud nedostatečně průkazné informace o terénních tvarech a zejména hranách a liniích, které jinak jsou ve vrstevnicové, či klasické topografické mapy často zakryty jinou informací. Při práci s DMT velmi vysokého rozlišení (cca 1 m) lze takto dokumentovat až mikrotvary reliéfu menšího území, což je vhodné zejména ke studiu lokální dynamiky reliéfu (sesuvy, eroze, poklesy apod.). Naopak při studiu rozsáhlejších území, např. celé ČR (**obr. 1**), stačí nižší rozlišení (n. 10 m – desítky metrů) a vyniknou tvary dokumentující celkovou konfiguraci reliéfu, regionální zvláštnosti rozčlenění (měkký flyš od Chřibů po Javorníky, kuesty křídové tabule na Jičínsku, Hořicku a Svitavsku, rozdíl mezi drobně členitým reliéfem západní části Českomoravské vrchoviny a plochým terénem s hlubokými údolími na jejím východě), linie poruch (četně prakticky v S – J směru mezi Plzní a Brnem) a kontury geomorfologických jednotek. V mnoha případech tyto projevy reliéfu mohou sloužit jako inspirace k revizi dosavadního regionálního členění reliéfu ČR.

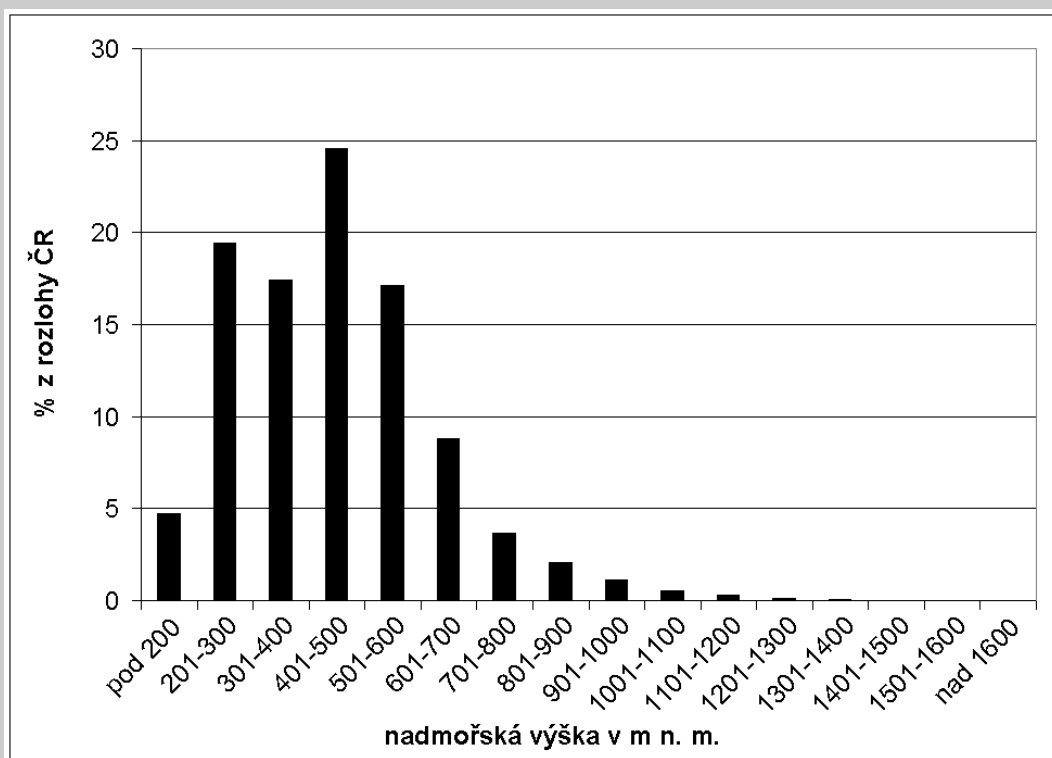
Terénní hrany v modelu zastíněného reliéfu lze identifikovat jak (1) vizuálně (lidské oko má tendenci prodlužovat lineární objekty

v obraze a případně je spojovat za sebou), tak (2) v GIS orientovanou filtrací, výběrem vhodného lokálního operátoru.

VÝŠKOVÉ STUPNĚ GEORELIÉFU

Výškové stupně georeliéfu jsou příkladem konvenčního nazírání na povrch naší planety. Klasifikace území podle nadmořské výšky má výraznou vzdělávací a praktickou stránku. Umožňuje znázornit a pochopit výškové parametry území a odhadnout s nimi související další parametry krajiny, podstatné pro řadu lidských aktivit a průběh krajinytvorných procesů. Vertikální rozdělení reliéfu do výškových, čili hypsometrických stupňů, je tradiční součástí obsahu atlasových i jiných fyzickogeografických map. Ačkoliv rozsah a barevné znázornění jednotlivých výškových intervalů se u jednotlivých tvůrců výrazně liší, ustálilo se používání zelených barev pro nižší nadmořské polohy pevniny. Do vyšších nadmořských výšek pak zelená přechází ve žlutou a posléze hnědou barvu. Nejednotné bývá znázornění nejvyšších lokalit bez ohledu na jejich absolutní nadmořskou výšku. Černá, fialová, tmavě zelená i bílá patří mezi nejpoužívanější barvy.

Přirozené výškové rozpětí území ČR nepřesahující 1500 metrů lze rozdělit do pořadí výškových intervalů buď konvenčně zavedením „standardně“ používaných výškových



Obr. 2 Zastoupení jednotlivých výškových stupňů reliéfu na území ČR odvozené z dat DMT

stupňů doložených v českých i zahraničních atlasech (v zemích s podobným výškovým rozptěním státního území), anebo zvolit vlastní stupnici (a barevné vyjádření), která nejlépe vystihuje tuto vlastnost georeliéfu České republiky. Při tvorbě vlastní stupnice výškových tříd se lze opřít o histogram (**obr. 2**) plošného rozsahu (zastoupení) území ve stometrových pixelech na území České republiky, což je operace, kterou právě použití DMT umožňuje. Z plošného rozsahu jednotlivých stometrových výškových stupňů vyplývá, že čtyři pětiny státního území se nacházejí mezi 200 a 600 m n. m. Čtvrtina státu se nachází mezi 400 a 500 m n. m. Pětina státu je v nadmořských výškách 200 až 300 m. Jen necelých 8 % státního území je nad 700 m n. m. Dřívější vyhodnocování výškopisných map takovéto hodnoty poskytovalo jen nepřesně, v podstatě jen rámcově měřením na mapách. Vyhodnocení DMT dává velmi přesné statistické údaje jak samostatně, tak kombinováním s jinými charakteristikami území (např. land use vs. charakteristika reliéfu), pokud je to zapotřebí.

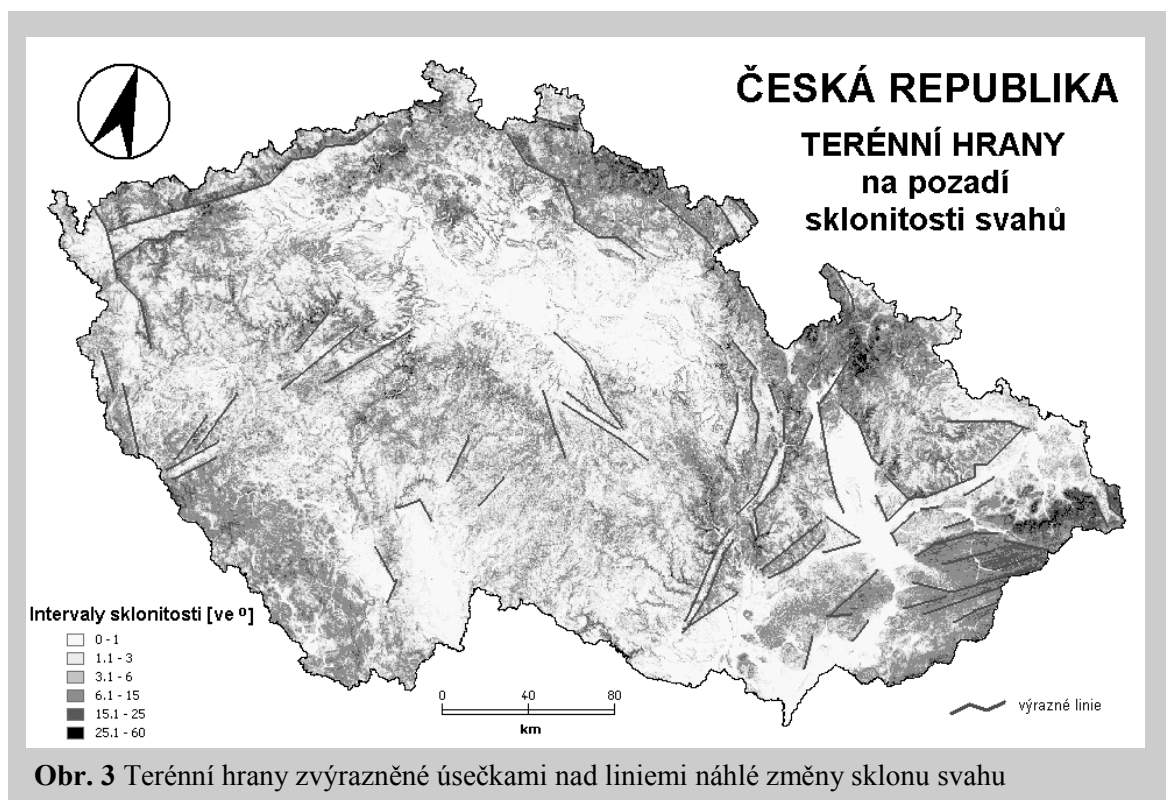
SKLONITOST GEORELIÉFU

Sklon georeliéfu je významnou přírodní charakteristikou krajiny. Sklon má významný vliv na energetické poměry lokality, neboť zásadním způsobem přerozděluje volnou disponi-

bilní energii. V závislosti na úhlu sklonu zemského povrchu se odvíjí počátek a průběh širokého spektra procesů. Významně rovněž působí na výběr a lokalizaci lidských aktivit v území.

Sklon georeliéfu je dán úhlem, který svírá rovina povrchu s vodorovnou plochou. Možností zjišťování sklonu georeliéfu se nabízí celá řada – od přímých měření v terénu počínaje po morfometrické operace nad výškopisnými údaji v mapách. DMT nabízí výpočet sklonitosti svahů v zásadě dvěma způsoby podle toho, v jaké podobě je model v databázi uložen – tedy v pravidelném rastru (pixely) nebo TIN (trojúhelníky). Rastrový model je často odvozen z modelu TIN, který je tvořen originálně pořízenými daty (fotogrammetricky, odečtením z vrstevnic). Digitální snímací technologie radarů a laserů umožňují již primárně konstrukci DMT v rastru. Přesnost stanovení areálů s předem definovaným sklonem svahů je tak předmětem diskuse. Hlavní roli vždy hraje rozlišovací schopnost primárních dat o terénu.

Mapa sklonitosti georeliéfu zobrazuje sklonové kategorie v automaticky generovaných či předdefinovaných intervalech podle účelu mapy sklonitosti. Interval sklonů vycházejí maximálně vstřícně dostupným odborným představám o roli jednotlivých sklonových kategorií v odstartování, akceleraci či průběhu řady přírodních pochodů nebo i lidských aktivit v úze-



Obr. 3 Terénní hrany zvýrazněné úsečkami nad liniemi náhlé změny sklonu svahu

mí. Interval sklonu od 0 do 1 stupně představuje „rovinu“, na které prakticky nedochází k pohybu hmoty účinkem gravitační síly. Území s tímto sklonem je využitelné pro rozmanité účely prakticky bez omezení, pokud se neuplatňuje limitující role dalších faktorů. Plochy se sklonem mezi 1 a 3° lze konvenčně označit za „ukloněnou rovinu“, na níž je průběh gravitačních procesů prakticky zadrženo přirozenou i antropogenní drsností povrchu. Omezení pro lidské aktivity zde nepůsobí. „Ploché svahy“ se sklonem mezi 3 a 6° umožňují iniciální rozvoj gravitačních procesů a povrchového odtoku. Z hlediska antropického využití tyto plochy již vyžadují zohlednění cestou výběru vhodné aktivity a používaných technologií či opatření. „Mírné svahy“ se sklonem mezi 6 a 15° jsou prostředím, v němž dosahují gravitační pochody a odtok stadia, které v případě absence přirozené či lidské kontroly může působit značné škody. Sklony mezi 15 a 25° již představují plochy „příkrých svahů“, kde není možné běžné zemědělské využití a kde akcelerované gravitační procesy nabývají až dramatického průběhu. „Srážky“ se sklonem nad 25° vyžadují již mimořádně zvláštní péči a mohou představovat i vážná bezpečnostní rizika v případě některých přírodních procesů i havárií.

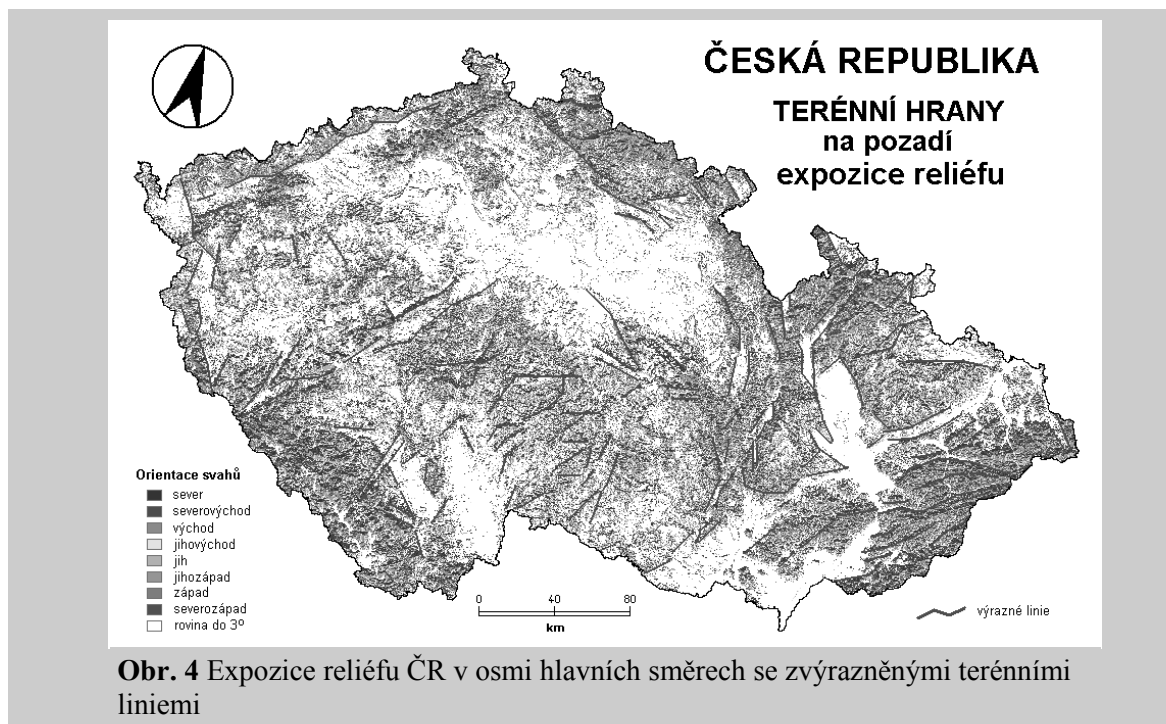
Vhodným výběrem sklonitostních kategorií a jejich kartografickým ztvárněním (obr. 3) lze zvýraznit opět jak terénní hrany, tak území s charakteristickou (obvykle od okolí odlišnou) převažující sklonitostí svahů (např. dendritické

tvary údolí vhloubených do zarovnaných povrchů, zlomové svahy, svahy kuest, nivy, regionální rozdíly mezi reliéfem hercynských a karpatských pohoří – zde prakticky absence velkých zarovnaných povrchů, lemy kotlin a pánví aj.). Takto objektivně vyniknou i regiony zatím nedostatečně zohledněné v regionálním členění reliéfu (např. Podkrkonoší v oblouku od Náchoda po Semily na severu po kuesty na Hořicku). Díky diskrétnímu charakteru modelu terénu lze podobně provést statistické vyhodnocení dat a zjistit, v jakých absolutních nebo relativních hodnotách jsou rozlišované (či jiné) sklonové kategorie zastoupeny na území ČR.

EXPOZICE GEORELIÉFU

Expozice georeliéfu je další významnou přírodní charakteristikou krajiny. Expozice má významný vliv na energetické poměry lokality, neboť zásadním způsobem přerozděluje dopadající přímé sluneční záření a v jistém směru srážky a výpar. V závislosti na orientaci zemského povrchu vůči světovým stranám tedy dochází k přerozdělování energie a vláh, což vede ke vzniku širokého spektra procesů a formuje jejich průběh a trvání. Významně rovněž ovlivňuje výběr a rozmístění lidských aktivit v území.

V kartografické a přírodovědné praxi je běžně rozlišováno 4, 8 nebo až 16 základních světových stran. Pro rozsáhlé území velikosti



Obr. 4 Expozice reliéfu ČR v osmi hlavních směrech se zvýrazněnými terénními liniemi

České republiky a vzhledem k použitému měřítku mapy je optimálním vyjádření osmi hlavních světových stran. Použité barvy mají odpovídat kartografickým a ekologickým standardům pro tuto problematiku – teplé barvy označují energeticky bohatší jižní sektory, chladnější barvy vlhčí a energeticky chudší severní sektory. Odfiltrovány a bílou barvou by měly být znázorněny plochy se sklonem do 3°, které jsou účelově (probíhající procesy) považovány za rovinu, vyloučenou z vyhodnocení digitálního modelu reliéfu pro účely stanovení expozice.

Zavedené SW GIS umožňují výpočet dalších charakteristik reliéfu, jako je vertikální či horizontální křivost, konvexita či konkavita terénu, identifikaci standardních terénních tvarů (sedel, hřebenů atd.). Dokonalejší SW GIS přímo zaměřené na vyhodnocení DMT navíc zahrnují rozmanité manipulace s DMT, jejichž výsledkem jsou různé transformace, zhlazování či rozčlenění reliéfu, široké spektrum statistických a geometrických charakteristik, viditelnost, dohlednost atd. V barevném provedení přehledná mapa expozice reliéfu (**obr. 4**) umožňuje zvýraznění výrazných linií v reliéfu.

STANDARDNÍ GIS ODVOZENINY DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU A JEJICH VYUŽITÍ K HODNOCENÍ KRAJINY

HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ

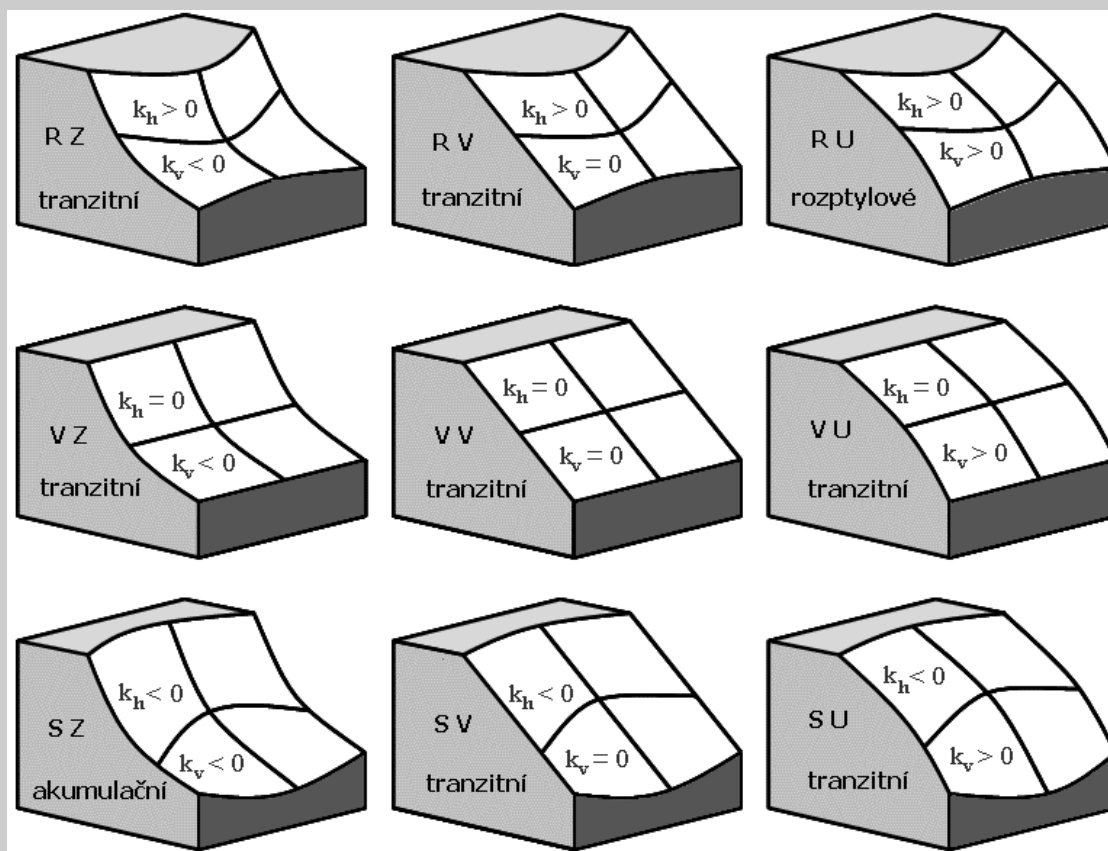
Řada dostupných SW GIS disponuje nástroji obvykle rámcově zahrnovanými do bloku

hydrologického modelování. Nástroje v nich zakomponované umožňují na bázi DMT identifikaci povodí s předem definovanou minimální nebo maximální velikostí (plochou), vymezení rozvodnic, směrů odtoku v jednotlivých plošných elementech DMT (pixelech, trojúhelnících), vytýčení hřbetnic a údolnic, spočítání jejich geometrických a statistických parametrů.

Nejčastěji využívanou procedurou je zjišťování elementárních povodí. Hydrologické modelování zde představuje proces identifikace areálů předem stanovené minimální a maximální velikosti (plochy), které jsou každý odvodňovány k jednomu uzávěrovému bodu. Území nad tímto bodem, kterým probíhá veškerý odtok z daného území, je elementárním povodím. Hranice elementárního povodí tvoří rozvodnice vůči sousedním elementárním povodím. Povodí mohou mít iniciální nebo tranzitní polohu. Iniciální jsou taková, která jsou odvodňována pouze z plochy vymezené příslušnou rozvodnicí. Tranzitní elementární povodí leží na vodním toku či údolnici a do nich vstupují trvalé či občasné toky drénující i plochy nad tímto povodím. Vstupními daty pro hydrologické modelování zaměřené na identifikaci elementárních povodí jsou obvykle rastrové DMT. V nich lze vypočítat charakter odtoku pro jednotlivé pixely a jejich shluky (**obr. 5**).

EROZNÍ MODELKY

V současné době je k dispozici řada vzorců (USLE - WISCHMEIER a SMITH 1958, STEHLÍK 1970 aj.), které se snaží odhadnout souvislosti mezi intenzitou eroze půdy, nejčastěji



Obr. 5 Vyhodnocením DMT lze v dílčích případech v terénu identifikovat (např. z hlediska transportu materiálů a parametrů odtoku) pouze akumulační, tranzitní a rozptylové zóny, ovlivňující i rychlost a rozložení (se zpomalením *Z*, urychlením *U*, soustředěním *S*, rozptýlením *R* nebo vyrovnáním *V* odtoku (podle KRCHO 1990) na základě horizontálního zakřivení k_h a vertikálního zakřivení k_v .

vodní eroze, a charakteristikami parametrů okolního prostředí, mezi nimiž nezastupitelnou roli hraje DMT.

Problematika eroze je značně složitá, ale DMT může opět významným způsobem přispět k efektivitě procesů souvisejících s kvantifikací erozního ohrožení území. Erozi je možné dělit jednak podle činitelů (vodní, eolická, nivální, glaciální a organogenní), a jednak podle projevů. Z hlediska projevů je v ČR nejdůležitější eroze vodní a větrná. Nejčastěji se však modeluje pouze intenzita eroze vodní, pomocí revidované univerzální rovnice ztráty půdy (RUSLE). Jde o erozní model (rovnici) pro predikci dlouhodobé průměrné roční ztráty půdy [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$] sestavený v 90. letech 20. stol. v USA na základě prověření, aktualizace a revidice USLE (1),

$$A = R * K * L * S * C * P, \quad (1)$$

kde *A* je průměrná roční ztráta půdy, *R* je faktor erozní účinnosti deště, *K* je faktor erodovatelnosti půdy, *L* je faktor délky svahu, *S* je faktor sklonu svahu, *C* je faktor ochranného účin-

ku vegetace a *P* je faktor protierozních opatření.

Ke stanovení jednotlivých faktorů se užívá experimentálních rovnic, nomogramů nebo map, a celou rovnici lze efektivně řešit za využití GIS prostředků (WILSON a LORANG 2000). Z hlediska DMT se jedná o zjišťování faktorů *L* a *S*. Některé produkty (SW Idrisi) mají již integrovaný modul pro tyto výpočty.

NETRADIČNÍ ODVOZENINY DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU A JEJICH VYUŽITÍ KE STUDIU RELIÉFU

ENERGIE GEORELIÉFU

Energie reliéfu představuje charakteristiku vypovídající o míře rozčlenění reliéfu a zejména o jeho vertikální členitosti. Je počítána v elementárních povodích se zohledněním nejvyššího a nejnižšího bodu povodí jako množství práce, kterou vykoná těleso o jednotkové hmotnosti během vertikálního přesunu z bodu

nejvyššího do bodu nejnižšího. Hodnoty energie reliéfu jsou klasifikovány do pěti tříd: velmi nízká, nízká, průměrná, vysoká a velmi vysoká.

Energie reliéfu je konvenční charakteristikou terénu, která v sobě integruje informaci o sklonitosti reliéfu, jeho vertikální a horizontální členitosti a vyjadřuje v podstatě „hodnotu transportní síly objektu pohybujícího se po povrchu“, resp. z lidského hlediska „míru námahy, kterou by člověk musel vynaložit na pohyb v terénu a transport věci“. V tomto případě je energie georeliéfu prezentována právě jako množství práce, kterou je nutno vykonat při přenesení jednotkového tělesa z místa lokálně nejnižšího do místa lokálně nejvyššího v elementárním povodí. Opačně je možné tuto hodnotu pojímat jako množství práce, které jednotkové těleso vykoná při přesunu z místa nejvýše položeného do místa nejnižšího položeného. Energii reliéfu lze počítat jak pro zcela „umělé“ územní jednotky (např. čtverce 1x1 km, 4x4 km), tak pro jednotky přirozené (např. povodí) (HENDL a LIEDTKE eds. 2002). Jako fyzikální hodnota je energie reliéfu v elementárním povodí počítána podle vzorce (2):

$$P = m * g * \Delta h, \quad (2)$$

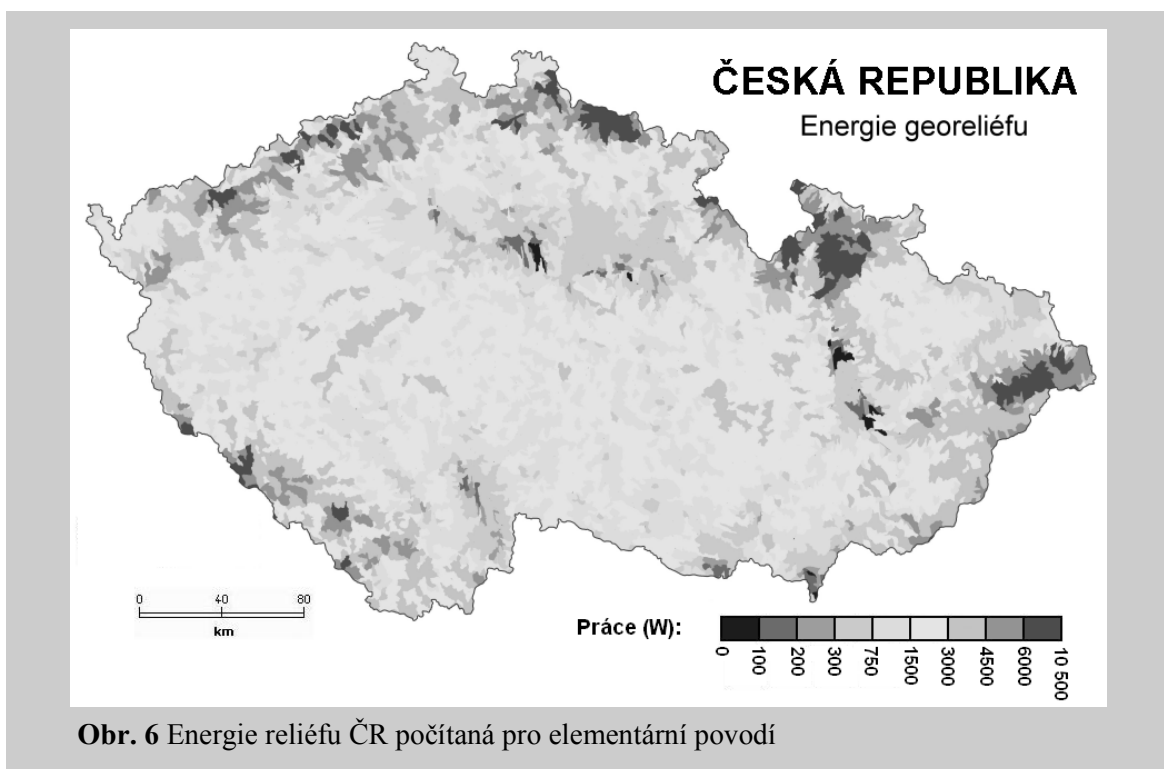
kde $m = 1$ (hmotnost tělesa), $g = 9,81$ (gravitační zrychlení), $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$ (relativní výška). Výsledek je definován jako vykonaná práce a je uváděn ve wattech. Charakteristiky pro Δh jsou odečítány v elementár-

ních povodích.

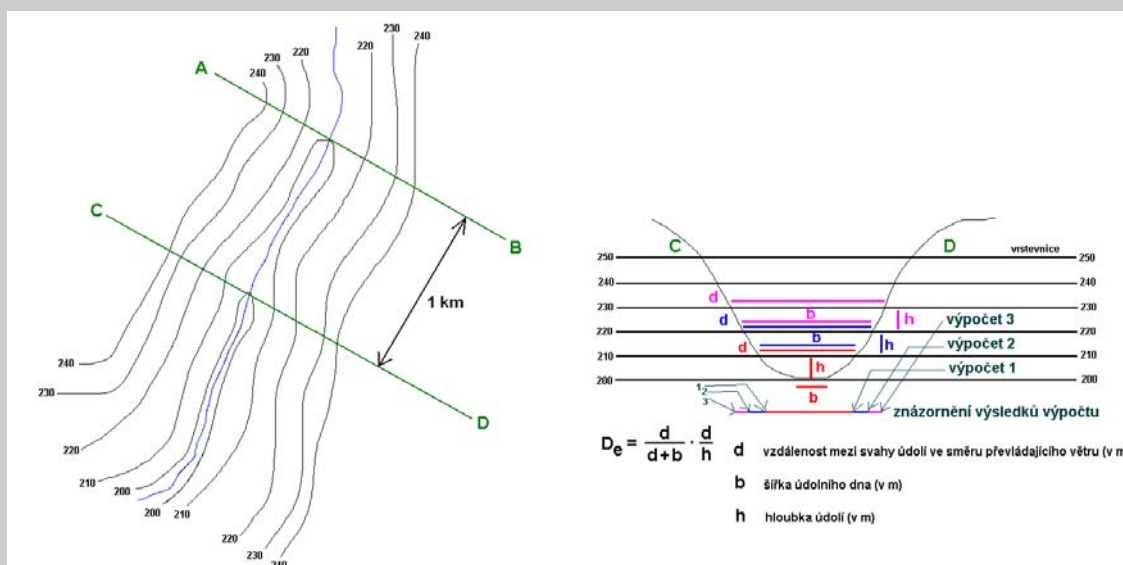
Vstupními daty pro hydrologické modelování zaměřené na identifikaci elementárních povodí pro celé území ČR v systému GIS GRASS je digitální model terénu v rastrové podobě s pixely o straně 100 m. Zadaná minimální rozloha povodí je 5 km². Touto procedurou bylo území ČR rozděleno do cca 7 tisíc povodí, v nichž byla hodnota energie reliéfu počítána (**obr. 6**). Výsledné hodnoty byly klasifikovány podle rozložení četností v histogramu do 5 kategorií (energie reliéfu: velmi nízká, nízká, průměrná, vysoká a velmi vysoká s uvedením číselných údajů). Nejvyššími třídami energie reliéfu disponují území s velkým výškovým rozpětím reliéfu v jednotlivých povodích, tj. s aximální vertikální členitostí reliéfu. Nejnižší hodnoty energie reliéfu vykazují rovinatá území vnitrozemí Čech a moravské úvaly. Prostorové rozložení hodnot energie reliéfu napovídá o možnostech ohrožení krajiny některými svahovými pochody (mass movements) a rychlým odtokem. S tím souvisejí také určité limity pro realizaci mnoha lidských aktivit v území.

PROVĚTRÁVÁNÍ GEORELIÉFU

Reliéf působí jako významný diferenciativní faktor zejména na chorické a topické úrovni rozrůznění krajinné sféry Země. Jeho účinkem je upravováno vzdušné proudění v přízemní vrstvě atmosféry, co se týče jak směru větru, tak především jeho síly. Uplatňuje se konfigurace reliéfu, jeho vertikální a horizontální čle-



Obr. 6 Energie reliéfu ČR počítaná pro elementární povodí



Obr. 7 Organizace a provedení výpočtu stupňů provětrávání georeliéfu

nitost, především hloubka rozčlenění a orientace elevačních nebo vhloubených tvarů střední velikosti.

Změny v obtékání vzduchu kolem překážky souvisejí s intenzitou náporu vzduchové hmoty na ní a způsobem uvolnění tohoto náporu. Rychlost obtékání lze graficky znázornit mírou nahuštění proudnic kolem jednotlivých částí překážky. Největší koncentrace proudnic se formuje kolem vrcholů elevací, nejnižší rozředění proudnic naopak při dnech elevací. Tento jev se jistým způsobem odráží ve vzhledu a fungování vybraných dotčených přírodních složek krajiny – v první řadě vegetace a pak půdy a vláhových poměrů. Ačkoliv jinak se chová vzdušný proud v závislosti na rychlosti v prostoru konkrétního tvaru reliéfu, lze orientačně stanovit míru tzv. provětrávání reliéfu v případě znalosti určitého směru větru v regionu. Provětrávání georeliéfu je relativní charakteristika, neboť je vztažena pouze ke směru větru bez ohledu na délku jeho trvání. To znamená, že hodnoty provětrávání reliéfu mohou být jak okamžité, tj. počítané ke konkrétnímu směru větru v daném momentu, tak dlouhodobé, neboli vztažené k dlouhodobým směrovým charakteristikám větru, např. k nejčetnějšímu směru větru měřenému v jednotlivých sektorech směrové růžice, dlouhodobému nejčetnějšímu směru větru počítanému podle sektoru nejčetnějšího směru a četností směrů sousedících, ať již byly zohledněny denní, měsíční, roční či jiné dlouhodobé hodnoty směru větru.

Míru čili stupeň provětrávání georeliéfu lze popsat hodnotami tzv. koeficientu efektivního provětrávání terénu D_e (podle BLAZEJCZYK 1975). Ten se počítá pro jednotlivé úsečky

přímky protínající vrstevnice ve vybraném území (**obr. 7**).

Výpočet vychází ze stanovení šířky údolního dna (b), šířky údolí (d) a hloubky údolí (h) (může jít však o jakýkoliv tvar reliéfu). Výpočet postupuje od nejnižších poloh směrem vzhůru. Vypočtené hodnoty koeficientu D_e jsou vztaženy vždy k „přírůstku“ (rozdílu) šířky údolí oproti šířce údolního dna. Hloubkou údolí může být výškový rozestup vrstevnic (Δh), zatímco šířkou údolního dna se stává „šířka údolí“ z předchozího kroku výpočtu. Ve výsledku jsou pak nejnižší hodnoty D_e uprostřed údolí (tj. u „dna“) a ty pak přibližně symetricky rostou ke skutečným okrajům údolí s rostoucí vzdáleností ode dna. Role drsnosti povrchu, včetně účinku vegetace, není do výpočtu zahrnována. Výsledky lze klasifikovat do intervalů (BLAZEJCZYK 1975) takto (**tab. 1**):

Jednotlivé regiony ČR, vymezené podle dlouhodobé studie větrných poměrů (SOBÍŠEK 2000) vykazují odlišné četnosti směrů

D_e	stupeň provětrávání reliéfu
pod 15,0	nedostatečné
15,0-30,0	velmi slabé
30,1-60,0	slabé
60,1-90,0	dostatečné
90,1-120,0	mírné
nad 120,0	silné

Tab. 1 Klasifikace stupňů provětrávání georeliéfu

proudění v průběhu teplé a chladné poloviny roku. Území ČR je tak rozděleno do 15 regionů s charakterickým rozložením četností směru větru do jednotlivých sektorů. V každém z těchto regionů byl vybrán sektor nejčetnějšího směru větru.

V digitálním modelu terénu s rozlišením 10 m byly hodnoty koeficientu D_e vypočteny pro teplé a chladné roční období roku. Západní polovina území ČR vykazuje standardní dominanci západního směru větru, takže rozdíly mezi ročními obdobími jsou z tohoto hlediska minimální (**obr. 8**). Jiná situace je na Moravě, kde dochází ke změnám směru větru ve většině regionů vymezených SOBÍŠKEM (2000).

Kartografické znázornění zohledňuje postup výpočtu pro síť paralelních přímků protínajících území ČR ve směru převládajícího směru větru buď v teplém, anebo chladném období roku (podle sektoru směrové růžice) v vzájemném kilometrovém rozestupu. Jednotlivé úseky jsou barevně znázorněny s takovou silou čáry, aby došlo v daném měřítku k pokrytí plochy celého státu. Jako poslední jsou znázorněny úseky s nedostatečným provětráváním.

ENERGIE JEDNOTKOVÉHO VODNÍHO TOKU

Teoretický výpočet energie jednotkového vodního toku vychází z předpokladu, že v elementárním povodí o velikosti min. 5 km² vykonává jednotkový objem (koule o objemu 1 m³) vody procházející po trase od nejvyššího do nejnižšího bodu povodí práci korigovanou drsností povrchu. Skutečný výkon toku pak odpo-

vidá průtoku v závěrovém profilu povodí.

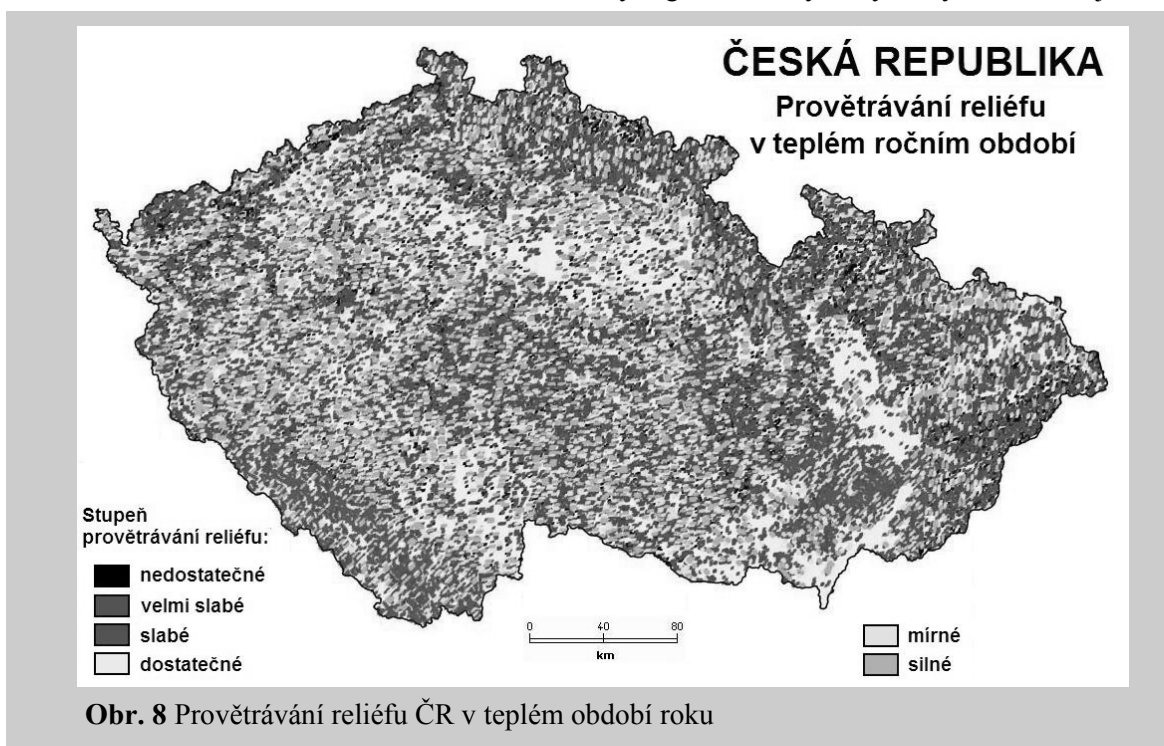
Energie vodních toků je funkcí mj. průtoku a sklonu řečiště. Jednotkový objem vody, pohybující se v ukloněném řečišti mezi jeho dvěma okrajovými body, které reprezentují nejvyšší a nejnižší místo standardního povodí, vykonává práci měřenou energetickým výkonem. Proti směru pohybující se vody působí drsnost řečiště.

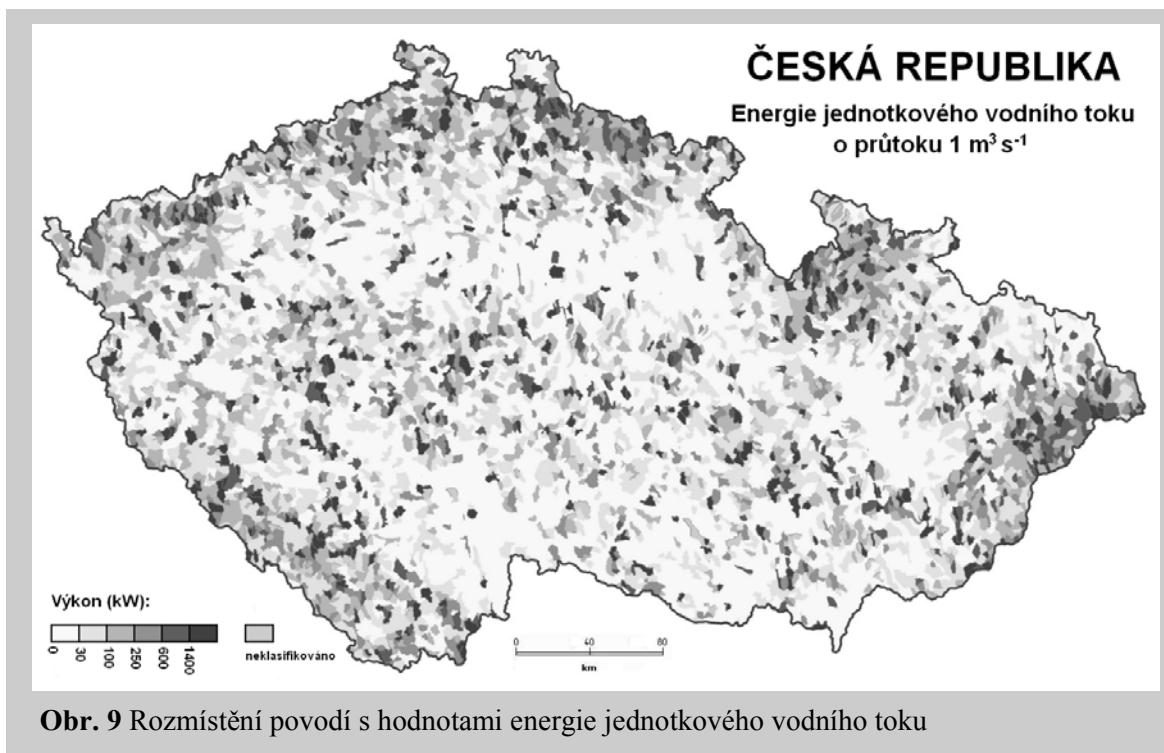
Výpočet lze realizovat podle vzorce (3):

$$P = 8,2 * 10^6 * (\Delta h^2 / l^2), \quad (3),$$

kde proměnná Δh je rozdílem nadmořských výšek obou extrémních bodů, l je jejich přímá vzdálenost, P je výkon ve watttech.

Zdrojem dat o vymezeném povodí a maximálním a minimálním výškovém bodě povodí, vč. délky přímé vzdálenosti mezi nimi je digitální model terénu ČR. Použitý DMT přesahující cca 50 km za hranici ČR s rozlišovací úrovní 100 m vedl k rozlišení cca 7000 povodí s minimální velikostí 5 km² nacházejících se zcela či zasahujících částečně na území ČR. V nich byly identifikovány nejvyšší a nejnižší body (vč. povodí přesahujících státní hranici) a stanovena délka přímé spojnice mezi nimi. Vzhledem k tomu, že body výškových extrémů povodí jsou dány polohou pixelů digitálního modelu terénu, které průměrují výškové parametry průmětu pixelu v reálném terénu, v jednom povodí se u maxim či minim mohly vyskytnout dva i více bodů se stejnými výškovými hodnotami. Za reprezentativní pak byly algoritmem vybrány body od sebe nejvzdá-





Obr. 9 Rozmístění povodí s hodnotami energie jednotkového vodního toku

lenější. V případě zakřivených povodí (několik desítek případů), kde přímá vzdálenost mezi maximální a minimální kótou povodí je mnohem kratší než skutečná délka povodí, nutno počítat s jistou chybou výpočtu. U přeshraničních povodí pak bylo nutno dohledat příslušné body a vzdálenosti v zahraničí.

Celkový obraz teritoriální distribuce energie jednotkového vodního toku ve sledovaných povodích poměrně dobře respektuje vertikální členitost reliéfu krajiny ČR (**obr. 9**). Potenciálně energeticky nejbohatší povodí se soustřeďují do pohraničních pohoří Čech, Moravy a Slezska. Ve vnitrozemí existuje pás mírně energeticky bohatších povodí od Slavkovského lesa přes Střední Čechy jižně od Prahy, přes Žďárské vrchy po Středomoravské Karpaty. Izolovaná potenciálně energeticky bohatší povodí se vyskytují i v sousedství větších niv, pokud se nedaleko nachází izolovaná významněji kóta definující výškové rozpětí povodí.

Význam takto zjištěných charakteristik reliéfu je zajímavý z hlediska oceňování možné-

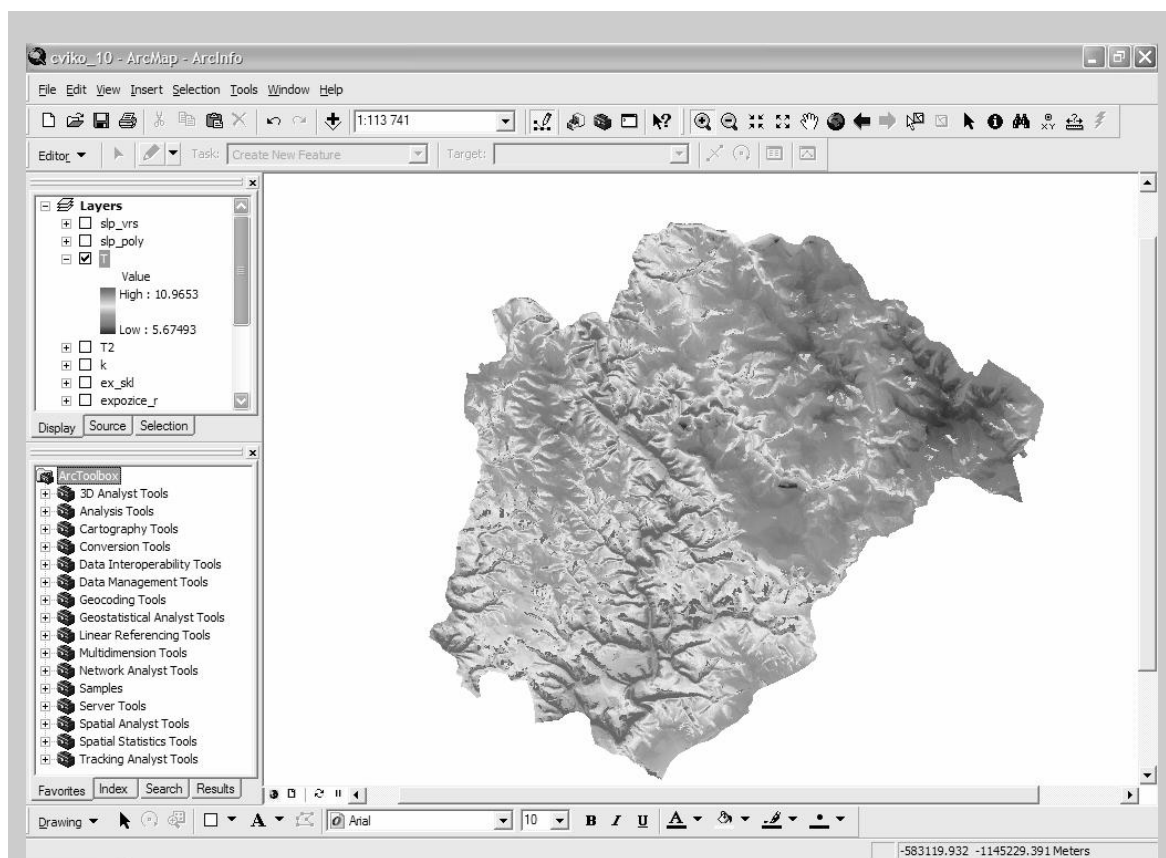
ho rizika např. výskytu extrémně rychlého odtoku po krátkodobých vydatných srážkách, eroze půdy či hloubkové eroze vodního toku.

MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍHO POLE

Modelování parametrů atmosféry patří v současné době k velmi dynamicky se rozvíjející oblasti využití interpolačních algoritmů. Většina těchto modelů sice primárně nepracuje s DMT, ale využívá obdobné procedury pro predikci hodnot. Mezi nejčastěji používané se řadí různé varianty krigování, stochastických simulací a neuronové sítě. Existuje však jeden ze základních klimatických parametrů, který velmi dobře koreluje s nadmořskou výškou a lze jej na základě DMT a dalších odvozených dat modelovat. Jde o průměrnou roční teplotu vzduchu, která jednak klesá s nadmořskou výškou (cca o 0,6°C na 100 m), ale je i ovlivňována sklonem a expozicí (úhlem a dobou, po kterou dopadá sluneční záření na povrch). Na základě této úvahy lze provést výpočet potenciál-

k	0 - 5°	5 - 10°	10 - 15°	15 - 20°	20 - 25°	25 - 30°	30 - 40°	40 - 50°
J	1,05	1,11	1,17	1,22	1,26	1,31	1,34	1,37
JV, JZ	1,04	1,10	1,16	1,20	1,24	1,26	1,28	1,30
V, Z	1,02	1,06	1,09	1,11	1,12	1,12	1,10	1,07
SV, SZ	1,00	1,02	1,01	1,00	0,99	0,97	0,92	0,84
S	0,99	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,81	0,75

Tab. 2 Koeficient relativní ozáření plochy (k) na základě sklonu a expozice (podle VAŠKŮ 1971)



Obr. 10 Výsledek výpočtu průměrné teploty vzduchu na území Školního lesního podniku Křtiny v aplikaci ESRI ArcGIS Desktop s ohledem na nadmořskou výšku, sklon a expozici svahů

ních průměrných ročních teplot vzduchu sestavením regresní rovnice závislosti teploty na nadmořské výšce a tyto hodnoty dále zpřesnit výpočtem rovnic za použití (**tab. 2**) koeficientů relativní ozáření plochy.

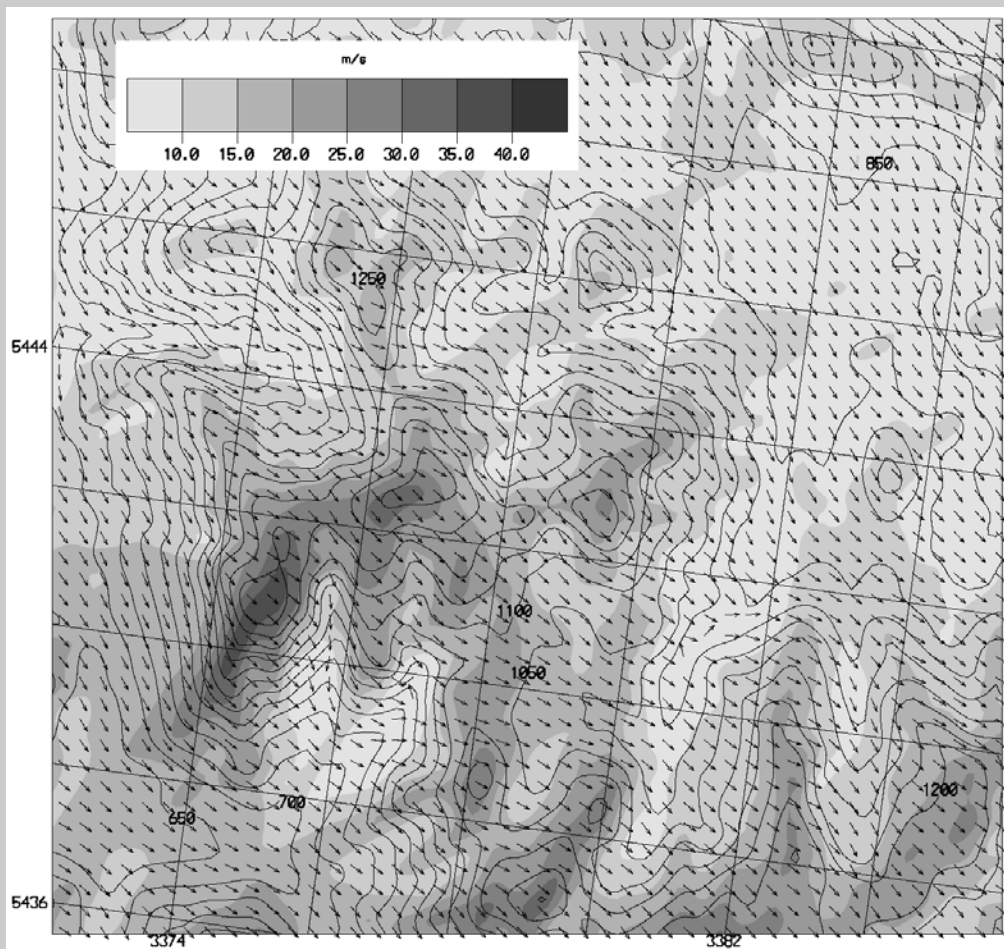
Při použití GIS je tento výpočet relativně jednoduchý, neboť se reálně pracuje pouze s klimatologickými daty (teplota vzduchu), DMT a s vypočtenými rovnicemi. Celou proceduru lze zefektivnit pomocí zápisu do makra. V první etapě se počítá regresní rovnice závislosti průměrné roční teploty vzduchu na nadmořské výšce podle údajů meteorologických stanic v zájmovém území. Ve druhé etapě je tento výpočet korigován (kladně nebo záporně) zohledněním sklonu a expozice svahu (**obr. 10**).

Tento výpočet sice může poskytovat zpřesnění odhadu průměrné roční teploty vzduchu na dané lokalitě, ale vzhledem ke komplexnosti přírodních procesů zde chybí některé další faktory, jako je například teplotní inverze v hlubších a úzkých údolích. Tyto jevy by se musely dále modelovat a začlenit do výpočtu. Obdobně lze provádět i výpočty délky a intenzity slunečního záření dopadajícího na povrch, a to na základě azimutu a elevace Slunce.

MODELOVÁNÍ VĚTRNÉHO POLE

Při matematickém modelování pole větru je DMT vhodným nástrojem pro přípravu okrajových podmínek, které jsou potřebné pro řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic představujících zvolený model proudění. Vzhledem ke své složitosti a specifickým rysům vyžadují tyto programy před spuštěním detailní analýzu řešeného problému, která vyústí v zadání řady speciálních parametrů a počátečních polí. Proto modely proudění nebývají integrovány do GIS programů. Takový postup navíc umožňuje modely proudění snadno modifikovat, případně jeden program zaměnit za jiný. Pokud jsou vyžadovány statistické charakteristiky rychlosti větru, bývá užitečné rozdělit výpočet na dvě na sebe navazující úlohy: výpočet souboru scénářů (tj. typických případů proudění) a statistické zpracování těchto scénářů. Takový postup se například využívá při posuzování ekonomické efektivity plánovaných větrných elektráren.

Úloha se značně zjednoduší, pokud nejde o dlouhodobé průměrné hodnoty, ale jen o vliv zemského reliéfu na proudění vzduchu při nějaké vybrané situaci. Jako příklad takového



Obr. 11 Proudění vzduchu dne 19. ledna 2007 v 00 hodin nad částí Šumavy. Pravoúhlá síť představuje Gaussovy souřadnice, šípkami je znázorněn směr proudění, rychlost větru v 10 m nad terénem je znázorněna ve stupnici šedi. Vrstevnice jsou zobrazeny po 50 m

modelování je zde uveden výpočet pole rychlosti větru během orkánu Kyrill nad vybraným územím Šumavy (v lednu roku 2007). K výpočtu pole proudění byl použit nehydrostatický nestacionární model proudění PIAPBLM vyvi-

nutý v ÚFA AVČR v.v.i. (SVOBODA a ŠTEKL 1994). Na obrázku (**obr. 11**) je demonstrován výsledek spočteného pole proudění v 10 m nad terénem pro situaci ze dne 19. ledna 2007 v 00 hodin.

téma	optimální rozlišovací úroveň DMT
optimalizace využití krajiny	1:5000 – 1:50 000
krajinné plánování	1:10 000 – 1:50 000
zalesňování	1:10 000 – 1:25 000
hodnocení rizik	1:10 000 – 1:100 000
modelování odtoku	1:10 000 – 1:25 000
modelování eroze	1:10 000 – 1:50 000
modelování znečištění vod a ovzduší	1:25 000 – 1:100 000
názorná komunikace s veřejností	1:10 000 - 1:1 000 000
typologické mapování krajiny	1:10 000 – 1:500 000
výpočet kubatur těles	1:500 – 1:5 000
fotorealistické 3D modely objektů a sídel	1:100 – 1:2 000
geomorfologická regionalizace	1:50 000 – 1:500 000
geomorfologické mapování	1:10 000 – 1:50 000

Tab. 3 Přehled vhodných měřítek (rozlišovací úrovně) DMT pro některé tématiké úkoly

DISKUSE K PRAKTICKÉMU VYUŽITÍ ODVOZENIN Z DMT

Digitální model terénu je zdrojem užitečných dat pro rozmanité interpretace, zejména pro výpočet přímých charakteristik reliéfu. Ve spojení s dalšími tematickými daty slouží v nejjednodušším případě jako 3D demonstrační prostředí, na které lze „naložit“ další tematické vrstvy od ortofotomapy po třeba i komplikovaně odvozenou tematickou vrstvu. V 3D podobě je pak obsah „naložené“ vrstvy daleko srozumitelnější i pro laického uživatele. Spektrum procedur, kam vstupují údaje s DMT spolu s dalšími datovými soubory, je neobyčejně široké a stále se objevují nové aplikace DMT pro výpočty v rozmanitých oborech výzkumu a praxe (tab. 3). V této souvislosti se objevuje otázka přesnosti a případného zkvalitnění údajů obsažených v DMT. Na toto téma byla zpracována řada srovnávacích studií. Z hlediska použití v geomorfologickém výzkumu jsou pozoruhodné práce J. SÍWEKA (2008), které dokládají, že v různých typech reliéfu vede generalizace DMT, tedy snižování jeho rozlišovací úrovně, k velmi diferencovaným výsledkům. Zatímco v některých typech reliéfu je generalizace snesitelná i při vysokém stupni zobecnění – měřeno změnou měřítka od 1:10 000 až na 1:200 000, v mladém členitém glaciálním reliéfu již nevelké snížení rozlišovací úrovně vede k úplné deformaci modelu, který tak již nedokumentuje vhodně zachycené území.

Při tvorbě tematických odvozenin na bázi DMT je tedy třeba vždy zvážit kvalitu výchozího modelu, jeho rozlišovací schopnost a ve vztahu k ní zhodnotit jeho vypovídací schopnost. V opačném případě by samozřejmě také od něj odvozené tematické mapy neodpovídaly realitě. Kvalita dat DMT by měla být zmíněna v metadatech k příslušnému datovému souboru. Z provedených studií se nabízí zkušenost, že vhodná rozlišovací úroveň (hrana obrazového elementu v m ve skutečnosti) rastrového DMT může být do 1 až 2M/5, kde M je „měřítko“ odpovídající rozlišení mapy (1: M 000, např. pro 1:100 000 je M=100). Vyšší kvalita je vítána, ovšem otázkou je objem zpracovávané (z hlediska kapacity) a výsledné (z hlediska interpretace) informace, tedy zda vyšší podrobnost přinese adekvátní informační zisk. V operačních měřících (pro přímé použití v praxi) to lze akceptovat při rozlišení odpovídajícím měřítku do 1:25 000, u přehledových (informativních) studií se vyšší kvalita v další použitelnosti odvozených map již nemusí projevit. Nejde totiž o jejich přímé použití v území.

PODĚKOVÁNÍ

Impulzem pro experimentování s rozmanitými deriváty DMT se stalo řešení projektů „Atlas krajiny České republiky“ (MŽP ČR VaV 600/01/03), dopadů orkánu Kyrill na lesní porosty Šumavy v rámci přeshraničního úkolu programu INTERREG IIIB CADSES (v rámci projektu STRiM pod číslem 5D008), výzkumného záměru MŠMT ČR č. MSM0021622-418 „Dynamická geovizualizace v krizovém managementu“ a výzkumného záměru Ústavu geoniky AV ČR v.v.i. č. AVOZ230860518.

LITERATURA

- BLAZEJCZYK, K. (1975). Wyznaczenie stopnia przewietrzania dolin. *Przegląd geograficzny*, 47, 1, 153 – 161.
- HENDL, M., LIEDTKE, H., eds. (2002). *Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie*. Justus Perthes Verlag, Gotha, 1 – 866.
- KRAUS, K. (2000). *Photogrammetrie Band 3. Topographische Informationssysteme*. Dümmler Verlag, Köln, 46 – 58.
- KRCHO, J. (1990). *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Veda, Bratislava, 261 – 274.
- MILLER, C. L., LAFLAMME, R. A. (1958). The digital terrain model – theory and application. *Photogrammetric Engineering*, 24, 3, 433 – 442.
- PFEIFER, N., POTTMANN, H. (1996). Surface models on the basis of a triangular mesh – surface reconstruction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, IWG III/IV, Vienna, 31, 638 – 643.
- SIWEK, J. (2008). Wpływ generalizacji na obraz rzeźby terenu. In Malicki, E., Spallek, W., eds. *Analizy przestrzenne w kartografii*. XVII Szkoła Kartograficzna, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, 31 – 32.
- SOBÍŠEK, B. (2000). *Rychlost a směr větru na území České republiky v období 1961-1990*. Národní klimatický program, Nakladatelství ČHMÚ, Praha, 29, 1 – 87.
- STEHLÍK, O. (1970). Geografická rajonizace eroze půdy v ČSR. Metodika zpracování. *Studia geographica*, 13, 1 – 40.

SVOBODA, J., ŠTEKL, J. (1994). Mesoscale modelling of a flow modification caused by orography. *Meteorologische Zeitschrift*, N.F. 3, 233 – 241.

VAŠKŮ, Z. (1971). Metodika vyhodnocení potřeby odvodnění a závlah. Státní meliorační správa, Praha. In Ambros, Z., ed. *Praktikum geobiocenologie*. 1. vyd., Ediční středisko MZLU v Brně, Brno, 2003. 1 – 98 s.

WILSON, J. P., LORANG, M. S. (2000). Spatial Models of Soil Erosion and GIS. In Fotheringham, A.S., Wegener, M., eds. *Spatial Models and GIS. New Potential and New Models*. Taylor and Francis, 83 – 108.

WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions of The American Geophysical Union*, 39, 2, 285 – 291.