

ZAROVNANÉ POVRCHY A ICH TEKTONICKÁ DIFERENCIÁCIA V PODMIENKACH VÝZDVIHU POHORÍ

Peter Orvoš*

* Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra fyzickej geografie a geoekológie, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava, peter.orvos@uniba.sk

Planation surfaces and their tectonic differentiation in the conditions of mountain uplift

Lithospheric uplift is driven by physical processes giving mountain ranges stepped character. It is shown here how a mountain belt evolves in such way and how it is possible to describe it by the tools of tectonic geomorphology. There is also an essential need to better investigate how planation surfaces reached their current elevations preserving the horizontal layout. Several mountain belts of the Western Carpathians were formed as levelled structures, what led to the assumption that these levels represent surfaces of different ages. However, many of them are exhumed erosion surfaces of the same age uplifted to discrete altitudes. To study this process, the concept of upwarped mountains formation was used and modified to model the single and two stepped mountain belts. The results were compared with cross-sections through certain mountain ranges showing the resemblance of real morphostructures to the models. These investigations provide an important insight into the evolution of planation surfaces in the conditions of mountain uplift.

Key words: mountain uplift, the Western Carpathians, planation surfaces, the Malé Karpaty Mts., the Malá Fatra Mts., the Veľká Fatra Mts., the Nízke Tatry Mts.

ÚVOD

Geomorfologické procesy podstatným spôsobom ovplyvňuje gravitácia. Hmotu litosféry, ktorá získala potenciálnu energiu výzdvihom, sa jej zbavuje premenou na kinetickú energiu, čo dáva gravitačne vedeným geomorfosystémom dynamiku (Krcho a Benová 2013). Objasnenie mechanizmu výzdvihu a denudácie je preto základným predpokladom pochopenia kolobehu hmoty recyklujúcej sa cez endogénne a exogénne pochody. Treba povedať, že kým eróznno-denudačným procesom sa v geomorfológii venuje podstatná časť výskumu, záležitosti zdvihu pohorí sú prevažne prenechávané tektonikom. Ale tvary pohorí, či už v plošnom pohľade alebo v priereze, ich výška, rozsah, priestorová štruktúra a všeobecný vzhľad sú plne uchopiteľné metódami geomorfológie. Potenciál tektonickej geomorfológie sa neobmedzuje len na vplyv zlomov a vulkanizmu na georeliéf, na ktoré sa najviac sústreďuje skúmanie endogénnych procesov. Pohoria sú po tektonických doskách morfoštruktúry druhého najvyššieho rádu a ich vznik (najmä z hľadiska súčasného reliéfu) zďaleka nie je uspokojivo vyriešený (Ollier a Pain 2000). Geomorfologické prístupy preto môžu prekvapivo priniesť zaujímavé a cenné poznatky.

V rámci pohorí vystupujú veľmi často ploché povrchy, a to ako malé enklávy alebo aj ako rozsiahle územia. Všeobecne sa tieto planačné plochy vyskytujú v rôznych výškach, na rôznom geologickom podklade, v odlišných klimatic-

kých podmienkach a je im prisudzovaný určitý vek a pôvod. Tieto špecifiká sa stali v slovenskej geomorfológii súčasťou rozsiahlej diskusie o zarovnaných povrchoch. Nie je cieľom predloženej práce sledovať vývoj týchto myšlienok, preto uvedieme len niektoré konkrétne poznatky. Téma bola nedávno dostatočne prehľadne spracovaná (Petrvalská 2009).

Plochý vyzdvihnutý reliéf, ktorý je na základe istých kritérií interpretovaný ako zarovnaný povrch, sa v súčasnosti spravidla nachádza mimo vplyvu fluviaálnych, marinných a iných procesov pôsobiacich v blízkosti erózných báz. Do svojej elevovanej pozície bol tektonicky vyzdvihnutý počas vývoja pohoria. Aj keď existuje planácia povrchu vo vysokých polohách (napr. Zhang et al. 2008), táto sa spája s rozširovaním rozsiahlejších plátov (špecifická erózna báza), ktoré do týchto pozícií dostali tektonické pochody. Mnoho scenárov popisuje, ako dochádza k planácii, ale ako sa horizontálny povrch rozčlení do určitých výškových úrovní, to najlepšie zachytáva model zlomovo-blokového pohoria. Schematicky je táto koncepcia nespochybniteľná, z hľadiska rôznorodosti morfoštruktúr pohorí ale málo presná a názorná. Predložený článok sa zameriava na detailnejšie preskúmanie a modelovanie rôznych možností zdvihu, ich vplyv na konkrétnu stavbu pohoria a zároveň na výškové a priestorové rozloženie denivelovaných zarovnaných povrchov. Na tento účel boli vytvorené ideálne modely deformácie litosféry v dvojrozmernom zobrazení, ktoré by mali zodpovedať priečnym rezom líniového pohoria. Programovanie predstavovaných variantov prebiehalo ako geometrická úloha, podobná metóde konečných prvkov, zachovávajúc plochu vstupného objektu aj po zmene jeho tvaru. Výsledky, ktoré naznačujú stupňovité zdvíhanie povrchu pri zachovaní horizontálnosti línii, sú porovnávané s reálnou topografiou niektorých pohorí Západných Karpát.

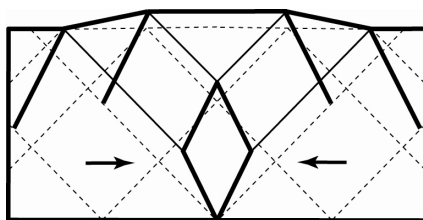
Modely výzdvihu pohorí prekonali od pôvodných klinových modelov popisujúcich pásmové kolízne orogény (Davis et al. 1983) zásadný pokrok vďaka výpočtovým metódam. Najnovšie modely predstavujú vlastne redukované trojrozmerné deformácie, ktoré sledujeme v reze. Z nich najprepracovanejšie sú numerický sandbox (Buiter et al. 2006) a model kôrových klinov konečnej šírky (Braun a Yamato 2010). V oboch prípadoch ide o mechanizmus, ktorý umožňuje vysvetliť, ako sa pôvodný povrch môže dostať v kvázi horizontálnej polohe do určitej relatívnej výšky. Podobným spôsobom, vychádzajúcim z teórie plasticity, sa dajú vytvoriť aj jednoduchšie názorné modely výzdvihu, ktoré môžeme zmenami počiatočných podmienok modifikovať a dostať rôznorodé výsledky pokiaľ ide o tvar, charakter a celkovú morfoštruktúru pohoria. Z nich odvodené následné modifikácie by mali reprezentovať viaceré možné modely výzdvihu a rozčlenenia zarovnaných povrchov.

Existencia stupňovitých planačných plôch v pohoriach z pohľadu týchto modelov nie je prekvapujúca a prirodzené môžu byť aj rôzne systémy viazaných stupňov, ktoré sa pôvodne interpretujú ako zarovnané povrchy rôzneho veku. Ide napríklad o stredohorskú a podstredohorskú roveň (Dzurovčin 1990 a Bizubová a Minár 1992), či „geomorfologické trioly“ Mičiana (2000). Samozrejme, že tektonické vplyvy môžu objasniť len niektoré otázky z problematiky zarovnaných povrchov. Je zložitejšie vysvetliť, kedy a ako boli iniciálne plochy vytvorené (Lukniš 1962). Mnohé z povrchov Západných Karpát sa odkryli po exhumácii spod rôznych pokryvov a sledovať ich genézu v čase pred

pochovaním je komplikované (Lukniš 1964). Ďalšie povrchy sú dôsledkom pediplanácie, ako napríklad systém poriečnych rovní (Mazúr 1963). Podobné je to aj s koncepciami synchrónnosti či nesynchrónnosti vývoja reliéfu (Urbánek a Lacika 1998, Urbánek 2001, Minár 2003 a Minár et al. 2011). Sledovanie týchto procesov v nadväznosti na tektoniku a komplexný vývoj pohorí však môže výrazne pomôcť hlbšiemu pochopeniu problematiky zarovnaných povrchov Západných Karpát.

METODIKA

Východiskom pre skúmanie výzdvihu zarovnaných povrchov je definícia modelových situácií, ktoré sa v prevažnej miere podieľajú na formovaní generálneho tvaru pohoria. Dominantný pohyb pri deformácii prebieha v zónach, ktoré sú orientované kolmo na seba, fyzikálne rozhrania pretínajú pod uhlom 45° (prerušované čiary na obr. 1).



Obr. 1. Jednostupňový model sklzových vrstiev

prerušované čiary – iniciálny stav, plné čiary – výsledný stav, šípky označujú pôsobenie deformačného napätia

Tak je to v prípade ideálnych materiálov, kde zanedbávame uhol vnútorného trenia. V realite, pre napätia vyvolané kompresiou, bude uhol menší. Zóny nemusia nutne odpovedať zlomom, sú to len špeciálne prípady, všeobecne ide o miesta povolenia a splasticizovania hornín.

Použitý matematický model vychádza z teórie plasticity (Nadai 1950), do tektoniky a geomorfológie bol aplikovaný ako model sklzových vrstiev (shear layers) pre vyklenuté pohoria (Orvoš 2011). V zredukovanej forme to predstavuje riešenie geometrickej úlohy, v ktorej dodržiavame princíp zachovania celkovej plochy pri deformácii konečných prvkov (v realite nestlačiteľnosť média) a translačné uhly zhodné so sklzovými. Centrálny štvorec postupne mení tvar na romboidálny a tejto zmene sa prispôbujú ostatné prvky. Vstupná sieť, skonštruovaná v modelovom obdĺžniku, sa zdeformuje aj nad hornou líniou, čo zachytáva vyklenutie povrchu (obr. 1). Jednotlivé vrstvy modelu sú inicializované buď naraz alebo postupne po vykonaní určitého počtu operačných krokov.

Pri porovnávaní reálnej morfoštruktúry s modelom, ktorý by mal predstavovať idealizovaný výzdvih horského pásma, sa predpokladá podobnosť s priečnym rezom pohoria. V digitálnom elevačnom modeli Eudem sa realizovali priečne profily (prostredie ArcGIS) jednoduchou líniou, aby bol výsledok čo najviac autentický. Vybrané miesta zodpovedajú výraznejším hrebeňom aspoň na jednej strane pohoria. Preukázanie stupňovitosti niektorých horstiev Západných Karpát v zmysle predkladaného mechanizmu pokladáme za dôležitý

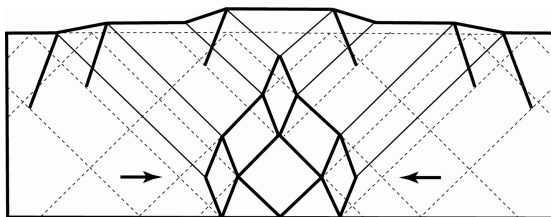
prvok verifikácie tohto modelu. Zvolené boli rezy východnou časťou Nízkyh Tatier (Kráľovoľské Tatry), Veľkou a Malou Fatrou a Malými Karpatmi.

MODELOVANIE STUPŇOVITÉHO VÝZDVIHU HORSKÉHO PÁSMÁ

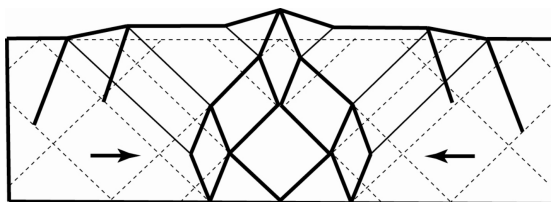
Litosféru považujeme za elastoplastické médium, ale ak je deformácia v plastickej časti prevažujúca, elastickú redukuje na pevnú. Potom uvažujeme o tzv. zónach sklzu (v modeloch zjednodušených na línie alebo plochy v 3D), kde sa menia hodnoty hydrostatického napätia a nastáva plastický tok materiálu. Tieto sa v ideálnom prípade pretínajú pod pravými uhlami. Tvorí spolu pole sklzových vrstiev (vymedzené líniami či plochami), ktoré v iníciaľnom štádiu predstavuje pravouhlá sieť. Táto sa počas postupujúcej deformácie mení na romboidálnu (obr. 1). Model je pre zjednodušenie len dvojrozmerný, so symetriou vo vertikálnej rovine. Inicializované sú jedna a tri vrstvy sklzu, naraz alebo postupne. Existujú dve možnosti inicializácie, s hlbšie alebo plytšie umiestneným centrálnym romboidom, čo dáva odlišné výsledky tvaru vyzdvihovaného povrchu. Ďalej budeme skúmať vplyv deformácie štruktúry na vznik stupňovitosti so zachovanými horizontálnymi úsekmi pri výzdvihu pôvodne plochého povrchu.

Model so súčasnou inicializáciou sklzových vrstiev

V tomto prípade sú všetky vrstvy aktívne od spustenia modelu, ich pohyb je určený mierou deformácie v tej-ktorej oblasti a stupňovitý profil povrchu sa vytvára od začiatku. V prípade nižšie umiestneného centrálného prvku vzniká nad ním vytláčaný trojuholník (veľkosť podľa hĺbky polohy centrálného prvku) a centrálny horizontálny povrch sa zachováva priamo nad stredom štruktúry (obr. 1 a 2). Stupňovité rameno je jedno, alebo je ramien viac podľa počtu inicializovaných vrstiev. Ak umiestnime centrálny prvok blízko povrchu, vytláča priamo centrálnu časť a trojuholník z predchádzajúceho prípadu nevzniká (obr. 3). Ramená sú znovu formované podľa počtu uvažovaných sklzových vrstiev.



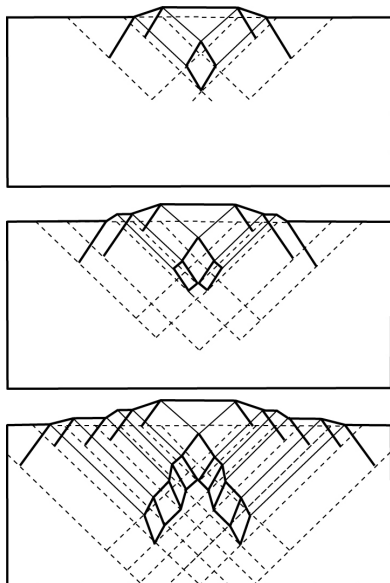
Obr. 2. Dvojstupňový model sklzových vrstiev s vrcholovým platô



Obr. 3. Dvojstupňový model sklzových vrstiev s vrcholovým hrebeňom

Model s postupnou inicializáciou sklzových vrstiev

Na rozdiel od predchádzajúceho nastavenia, jednotlivé sklzové vrstvy sú aktivované s určitým oneskorením. Ďalší stupeň na povrchu sa formuje až po sformovaní elevácie bližšie k centru. Konečný výsledok tohto procesu je podobný ako v predošlom prípade. Špeciálnym prípadom postupne inicializovaného modelu je variant, kde v mieste iniciálneho povolenia vznikne najprv malý medzistupeň. Táto možnosť je zobrazená na dvojstupňovom modeli (obr. 4).



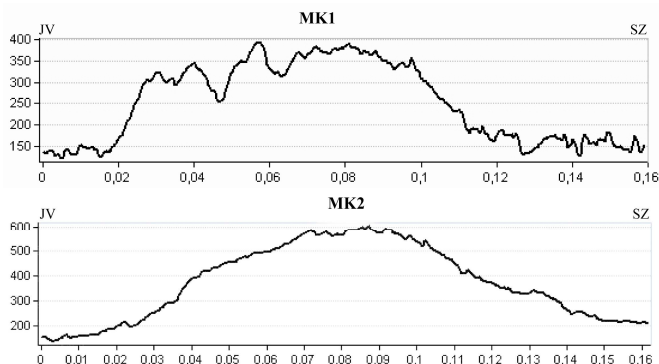
Obr. 4. Postupne inicializovaný model sklzových vrstiev s medzistupňom

APLIKÁCIA MODELU V OBLASTI ZÁPADNÝCH KARPÁT

Z modelovania zdvihu stupňovitého pohoria vyplýva rozmanitosť možných scenárov pre výškové rozloženie planačných povrchov. Najjednoduchší prípad je vyzdvihnutie líniového pohoria s vrcholovým plató, podobne ako v jedno-stupňovom modeli (obr. 1). Rozsah skrátenia priestoru je malý a tieto povrchy nedosahujú veľkú nadmorskú výšku. Príkladom tohto typu pohoria môžu byť Malé Karpaty, kde bola vyzdvihovaná široká vrcholová plošina, viditeľná pri priečnom reze morfoštruktúrou (obr. 5).

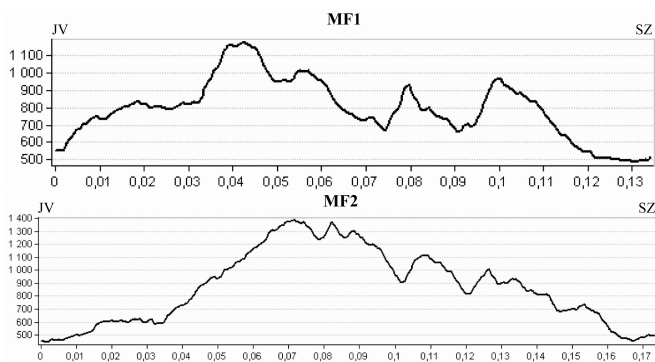
Vyššie horské pásma tohto typu musia byť viacstupňové, aby skracovanie priestoru mohlo pokračovať. Všetky stupne sa môžu dvíhať synchronne, alebo sa vrstvy sklzu inicializujú postupne jedna za druhou, po dosiahnutí určitého napätia v materiáli. Na vývoj zarovnaných povrchov má tento rozdiel zásadný vplyv, pretože v prípade ich súčasného dvíhania z iniciálnej polohy je vek ich zdvihu rovnaký a nedá sa povedať, že vyšší stupeň je zo staršej tektonickej fázy a nižší z mladšej (obr. 2 a 3). Ak sa stupne zdvíhajú postupne (môže to byť aj v rámci jednej dlhšej tektonickej epizódy), skôr vyzdvihnuté časti budú, samozrejme, denudované viac (obr. 4). Model uvažuje len o zjednodušenom

kompresnom režime počas zdvihu pohoria, je síce možné ho na určitý čas pozastaviť (simulovať obdobie nižšej tektonickej aktivity), ale konkrétnu časovú mierku neobsahuje.

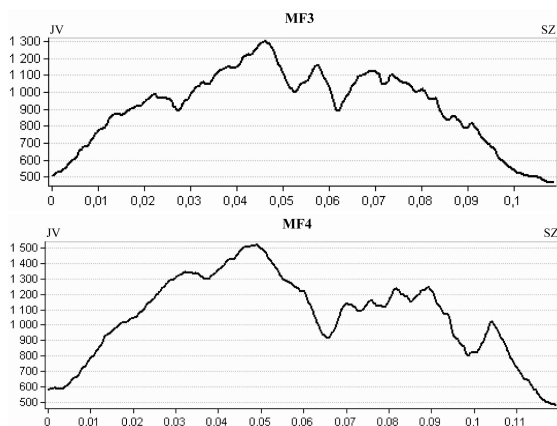


Obr. 5. Pričné rezy Malými Karpatmi (MK1 – Bratislava Nové Mesto – Hrubý Drienovec – Záhorská Bystrica, MK2 – Limbach – Hrubý vrch – Beňovský potok)
vertikálna os – nadmorská výška v metroch, horizontálna os – dĺžka v $\text{km} \cdot 10^{-2}$.

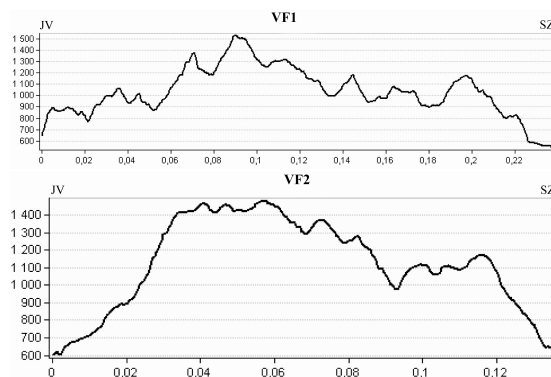
Z pohorí Západných Karpát, ktoré presahujú nadmorskú výšku 1 200 metrov, je viacero dvojstupňových. Centrálna hrebeňová časť leží často okolo 1 400–1 600 m n. m., bočné stupne 1 000 až 1 200 m n. m. Takýto charakter má Malá Fatra (Lúčanská Fatra aj Krivánska Fatra), ale aj Veľká Fatra. Pričné profily morfoštruktúrou ukazujú dva stupne po stranách pohorí (obr. 6, 7 a 8). Tento dvojstupňový systém bol študovaný v súvislosti so zlomovými svahmi (Urbánek 1999). Nízke Tatry v kráľovoholskej a čertovickej oblasti (Priehyba) majú tento charakter len na severe, sú teda viditeľne asymetrické (obr. 9 a 10). Vysoké a Západné Tatry majú v niektorých oblastiach tiež znaky stupňovitého pohoria, ale ich vzhľad nie je typický aj s ohľadom na značný stupeň glaciálnej deštrukcie.



Obr. 6. Pričné rezy Lúčanskou Fatrou (MF1 – Vríca – Skalky – Rajecká Lesná, MF2 – Turčiansky Peter – Humieňa – Poluvsie)



Obr. 7. Priechne rezy Krivánskou Fatrou (MF3 – Biely Potok – Kľačianska Magura – Krashany, MF4 – Šútovo – Snidovské – Vyšné Kamence)

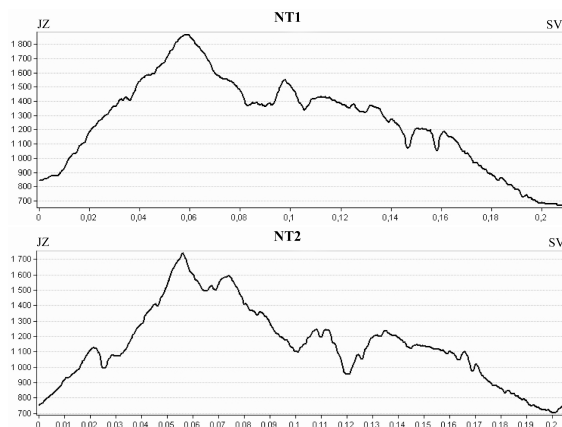


Obr. 8. Priechne rezy Veľkou Fatrou (VF1 – Motyčky – Suchý vrch – Necpaly, VF2 – Liptovská Osada – Skalná Alpa – Ľubochnianska dolina)

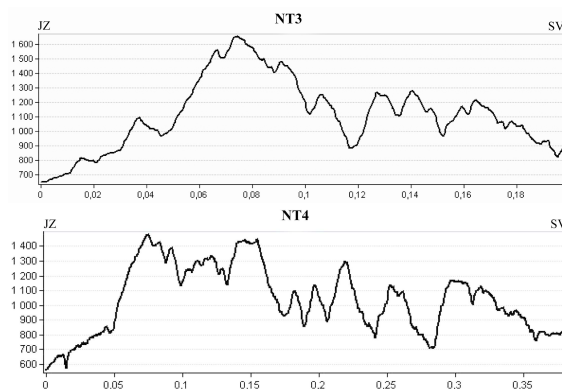
Stredohorský povrch na mnohých miestach sleduje tzv. podstredohorská roveň, ako nevýrazný plochý stupeň (Bizubová a Minár 1992 a Jakál 2001). Jej existencia na okrajových svahoch môže byť na viacerých miestach tektonického charakteru. Model s postupne inicializovanými sklzovými vrstvami pripúšťa vznik úzkeho stupňa pred výzdvihom nasledujúcej úrovne. Fyzikálne je proces závislý od viacerých počiatočných podmienok, a preto rovnako možné je vytvorenie aj nevytvorenie tohto medzistupňa. V Malej Fatre bol popísaný príklad, ktorý by mohol zodpovedať vzniku podstredohorského povrchu oneskoreným tektonickým skokom (Urbánek 1999), rovnako je to aj v oblasti Kremnických vrchov (Lacika 1994 a 2003) či na okrajoch krasových planín (Jakál 2001).

Viacere zarovnané povrchy boli vyzdvihovalé ako rozsiahle plató, kde jednoduchý model líniových pohorí nie je možné aplikovať. Pre tieto platí zrejme model výzdvihu uzavretých pravouhlých buniek litosféry (Braun a Yamato 2010). Takéto povrchy sa v Západných Karpatoch nachádzajú v nad-

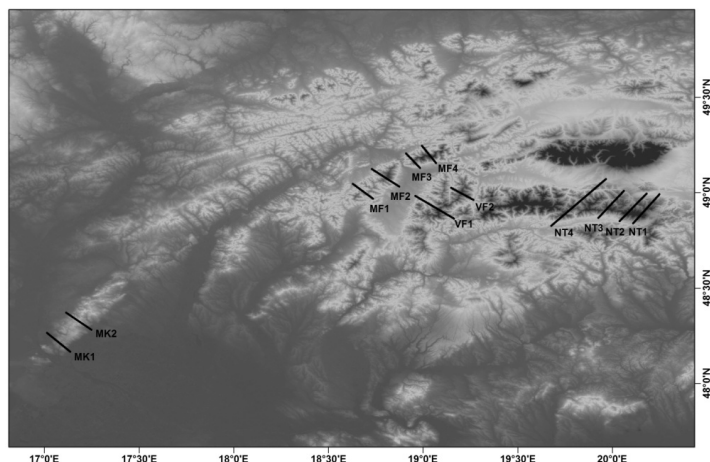
morských výškach od 1 000 do 1 200 m n. m., najčastejšie v okolí 1 100 m n. m. Dnes sú značne členené a tvoria len zvyšky v Slovenskom raji, na Muránskej planine, Galmuse alebo Sihle. Ostatné na juh klesajúce kryhy ako Slovenský kras, Krupinská planina či Blžská a Pokoradzská tabuľa nedosiahli takéto výšky pre svoju okrajovú polohu a subsidenciu.



Obr. 9. Priečné rezy Nízkymi Tatrami v oblasti Kráľovej hole (NT1 – Šumiac – Kráľova hoľa (Čelo) – Spišské Bystré, NT2 – Pohorelská Maša – Bartková – Vikartovce)



Obr. 10. Priečné rezy Nízkymi Tatrami v oblasti Priehyby (NT3 – Závadka nad Hronom – Veľká Vápenica – Dikula – Čierny Váh, NT4 – Zadné Halny – Kečka – Končisté – Čierny Váh – Važec)



Obr. 11. Lokalizácia priečných rezov v oblasti Západných Karpát (model Eudem)

DISKUSIA

Otázka, aký bol vývoj toho-ktorého zarovnaného povrchu, by mala obsahovať tri parciálne podotázky: Kedy bol prvýkrát daný iniciálny povrch plochý? Kedy mohol byť remodelovaný (rozšírený)? Kedy bol vyzdvihnutý do súčasnej pozície? O polygenetickosti zarovnaných povrchov sa uvažovalo už dávno (Lukniš 1964), že sú to povrchy aj tektonicky polygenetické (prekonali fázy zdvihu a subsidencie), to hovorí novšia idea tektoplénu (Minár 2003). Pre model výzdvihu pohoria je existencia iniciálneho povrchu rozhodujúca, pretože z neho nastáva postupné rozčleňovanie do jednotlivých stupňov. V zásade pri modelovaní ide o posledný plochý povrch pred finálnou fázou zdvihu, predchádzajúce obdobia transformácie nie sú zahrnuté. Pri súčasných znalostiach je obťažné určiť, aký mal tento povrch charakter a vek v rôznych oblastiach Západných Karpát. Môžeme len konštatovať, že Slovenské rudohorie malo počas výzdvihu charakter rozsiahlych plátov, čo kontrastuje s líniovosťou západne situovaných pohorí. Taktiež Nízke Tatry mohli mať spočiatku podobný vývoj, kým rapidný výzdvih centrálného hrebeňa nezmenil vzhľad morfoštruktúry.

Úvahy o iniciálnych zarovnaných povrchoch sa odvíjajú prevažne od miesta formovania, ktoré obvykle leží v blízkosti eróznej bázy. Vo vyzdvihovaných pohoriach je teda možnosť existencie takýchto povrchov iba krátko po započatí výzdvihu, ich zachovanie v ďalšom vývoji je prakticky veľmi obmedzené. Výnimkou je exhumácia plôch spod rôznych nadložných komplexov, štruktúrna rovinnosť, čo je častý prípad plochých hrebeňov, alebo iné procesy (napr. kryoplanácia). Vo všeobecnosti však musí mať výzdvih takéhoto pohoria stupňovitý charakter, aby planačné či štruktúrne plochy ostali horizontálne. Vzniknuté systémy zarovnaných povrchov sa v jednotlivých pohoriach Západných Karpát vyznačujú nielen veľkou komplexnosťou vývoja, ale aj výškových a priestorových vzťahov. Význam exhumovaných povrchov môže tiež prekráčať súčasné predstavy. Určenie času a spôsobu formovania iniciálneho povrchu pre ten-ktorý orogénny impulz je veľmi dôležité, pretože povrchy

môžu byť značne odlišného veku. Ak z tohto pohľadu posúdime genézu zvyškov zarovnaných povrchov Západných Karpát, hľadanie ich spoločných predkov sa môže posunúť ďaleko do minulosti.

ZÁVER

Vývoj pohorí podlieha zákonitostiam, ktoré prirodzene určujú ich stupňovitý charakter. Modelovanie zdvihu metódou sklzových vrstiev dáva možnosť ukázať proces v jednoduchšej, ale názornej podobe. Podľa aplikovaného napätia a následného skrátenia priestoru sa horské líniové pásmo usporiada do jedno-, dvoj- či viacstupňovej morfoštruktúry. Tieto vrstvy sa dajú aktivovať tak, že sa dvíhajú naraz alebo postupne jedna po druhej. Môže to mať rozhodujúci vplyv na časový sled členenia pôvodného zarovnaného povrchu. Za určitých okolností vznikajú pred inicializáciou novej vrstvy prechody prejavujúce sa krátkymi medzistupňami. Od rozsahu aktivovanej vrstvy závisí aj dosah zdvihu od osi pohorí. Prvé stupne môžu byť vyzdvihnuté do svojich výšok na malom priestore. Ďalšie sa dvíhajú ako čoraz rozsiahlejšie oblasti, ale ich odčleňovanie môže nasledovať v kratších intervaloch.

Hoci výzdvih pohorí nemá veľa spoločného so vznikom zarovnaných povrchov, ich dopravenie v horizontálnej polohe do tej-ktorej výšky úzko súvisí s faktom, že ich môžeme stále pozorovať ako ploché. Vnútna stavba horských pásiem ovplyvňuje vývoj týchto plôch počas zdvíhania, istý čas sa udržia v reliéfe ako záznam minulých procesov, až kým nie sú deštruované eróziou. Po cykle dvíhania je pohorie postupne denudované a vytvorený tektonoplén sa stane iniciálnym povrchom pre nasledujúci orogénny impulz. Oblasť Západných Karpát bola takto niekoľkokrát prepracovaná a ako vývoj pokračoval, hromadili sa zdedené črty prirodzene v zarovnaných povrchoch, kde jedine mohli uniknúť erózii. Inde sa zachovať nemohli. Z tohto dôvodu je pohľad na plochý povrch v pohoriach vždy unikátny, lebo v ňom prirodzene tušíme znaky minulosti, ktorá v ostatnom reliéfe už nie je prítomná.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0625-11.

LITERATÚRA

- BIZUBOVÁ, M., MINÁR, J. (1992). Some new aspects of denudation chronology of the West Carpathians. In Stankoviansky, M., ed. *Abstracts of papers International Symposium, Time, frequency and dating*. Tatranská Lomnica – Stará Lesná, Slovakia, 16 – 21 June 1992. Bratislava (Geografický ústav SAV), p. 10.
- BRAUN, J., YAMATO, P. (2010). Structural evolution of a three-dimensional, finite-width crustal wedge. *Tectonophysics*, 484, 181-192.
- BUITER, S., BABEYKO, A., ELLIS, S., GERYA, T., KAUS, B., KELLNER, A., SCHREURS, G., YAMADA, Y. (2006). The numerical sandbox: comparison of model results for a shortening and an extension experiment. *Geological Society, London, Special Publications*, 253, 29-64.
- DAVIS, D., ŠUPPE, J., DAHLEN, F. (1983). Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, 88, 1153-1164.
- DZUROVČIN, L. (1990). *Geomorfologická analýza strednej časti Slanských vrchov*. Kandidátska dizertačná práca, Geografický ústav SAV, Bratislava.

- JAKÁL, J. (2001). Krasové okrajové roviny a podstredohorská roveň. *Geomorphologia Slovaca*, 1, 40-45.
- KRCHO, J., BENOVÁ, A. (2013). Problém správnej a exaktnej definície geometrických foriem georeliéfu vzhľadom na tiažové pole Zeme. *Geografický časopis*, 65, 189-216.
- LACIKA, J. (1994). Príspevok k poznaniu veku zarovnaných povrchov v Slovenskom stredohorí. *Geographia Slovaca*, 7, 81-102.
- LACIKA, J. (2003). Planation surfaces of the Kremnické vrchy Mts. *Geomorphologia Slovaca*, 3(1), 113-117.
- LUKNIŠ, M. (1962). Die Reliefentwicklung der Westkarpaten. *Wissenschaftliche Zeitschrift des M. Luther Universität Halle-Wittenberg*, 11, 1235-1244.
- LUKNIŠ, M. (1964). Pozostatky starších povrchov zarovnávaní reliéfu československých Karpát. *Geografický časopis*, 16, 289-299.
- MAZÚR, E. (1963). *Žilinská kotlina a prilahlé pohoria (geomorfológia a kvartér)*. Bratislava (Vydavateľstvo SAV).
- MÍČIAN, Ľ. (2000). Hypotéza o neogénnych geomorfologických triolách v Malých Karpatoch na území Bratislavy. In Lacika, J., ed. *Zborník referátov. 1. konferencia Asociácie slovenských geomorfológov pri SAV. Liptovský Ján, 21. – 23. september*. Bratislava (Asociácia slovenských geomorfológov pri SAV), pp. 82-85.
- MINÁR, J. (2003). Stredohorská roveň v Západných Karpatoch ako tektonoplén: náčrt pracovnej hypotézy. *Geografický časopis*, 55, 141-158.
- MINÁR, J., BIELIK, M., KOVÁČ, M., PLAŠIENKA, D., BARKA, I., STANKOVIANSKY, M., ZEYEN, H. (2011). New morphostructural subdivision of the Western Carpathians: an approach integrating geodynamics into targeted morphometric analysis. *Tectonophysics*, 502, 158-174.
- NADAI, A. (1950). *Theory of flow and fracture of Solids*. New York (McGraw-Hill).
- OLLIER, C., PAIN, C. (2000). *The origin of mountains*. London (Routledge).
- ORVOŠ, P. (2011). Formation of upwarped mountains by horizontal compression of lithosphere in shear layers model: a review. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 41, 267-277.
- PETRVALSKÁ, A. (2009). Vývoj názorov na vznik a genézu zarovnaných povrchov Západných Karpát. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 9(2), 64-77.
- URBÁNEK, J. (1999). Problém zlomových svahov v Západných Karpatoch. *Geografický časopis*, 51, 5-18.
- URBÁNEK, J. (2001). Nová paradigma slovenskej geomorfológie? *Geomorphologia Slovaca*, 1, 84-90.
- URBÁNEK, J., LACIKA, J. (1998). Morfoštruktúry Západných Karpát. *Acta Facultatis Studiorum Humanitatis et Naturae Universitatis Prešovensis*, 30, 248-258.
- ZHANG, X., HE, X., WANG, Y., LONG, Y. (2008). Planation surfaces on the Tibet Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 5, 310-317.

Peter Orvoš

PLANATION SURFACES AND THEIR TECTONIC DIFFERENTIATION IN THE CONDITIONS OF MOUNTAIN UPLIFT

The mass of the lithosphere, which acquired potential energy, gives dynamics to all gravitation driven geomorphosystems (Krcho and Benová 2013). So the explanation of uplift and denudation should also be the main task of geomorphology. Flat parts are often incorporated in the typical mountainous landscape as small enclaves or larger areas. These planation surfaces developed mostly near erosion bases and were transported in a

horizontal position to higher altitudes. Various tectonic models make it possible to study how this process took place and how the stepped mountain ranges originated (Buiter et al. 2006, Braun and Yamato 2010). The existence of stepped planation surfaces is not surprising from the point of view of these models and can help us to understand the evolution of morphostructures also within the Western Carpathians.

The method described here comes from the theory of plasticity and has been introduced to tectonics and geomorphology as a shear layer model for upwarped mountains (Orvoš 2011). It merely represents the geometrical solution of the problem, when the compression of material and exploration of translations on several slip zones are considered. The initial net, constructed in the defined rectangle deforms above its upper line, which reflects the upwarp of the lithosphere (Fig. 1). This upwarp comes in several horizontal steps and should represent the uplift of an idealized mountain range. For verification of the model, cross-sections through mountain chains of the Western Carpathians have been constructed and discussed.

The shear layers field is a rectangular net in its initial stage. As the deformation proceeds it slowly changes to rhomboidal. There are two modes of model activation and several variations. One with simultaneous and another with gradual initialization of shear layers. There are one, two or more stepped layers, by the number of initialized layers (Figs. 1, 2 and 3). A special case of the gradually initialized model is a variant, where the small mid-level develops at the place of yielding (Fig. 4).

As the models show, the altitudinal distribution of planation surfaces can be variable. The simplest case is the uplift of the linear range with a plateau top presented here by the Malé Karpaty Mts. as a possible example (Fig. 5). Other mountain chains, such as the Malá Fatra Mts., and Veľká Fatra Mts. (Figs. 6, 7 and 8) or the Nízke Tatry Mts. in certain parts (Figs. 9 and 10) are two-stepped. The mid-level step can represent the mid-mountain surface (Bizubová and Minár 1992 and Jakál 2001) with the tectonic origin in some places (Urbánek 1999).

Although the uplift of mountains is not directly connected to the origin of planation surfaces, the way they were transported to higher altitudes is the reason why they still look flat. Some developed as the initial surfaces, some were exhumed, and some are simply structural plains. But in general, the evolution of mountain ranges must have had a stepped character to keep these surfaces near a horizontal position, as is presented in the models studied here.