

Kolize litosférických bloků příčinou orogenezí?

RUDOLF ORLT¹

Úvod

Starší hypotézy o vzniku horských pásem (orogenezí), jejich příčinách a průběhu byly postupně zatlačeny stále vážnějšími námitkami: neodpovídaly zjištěným skutečnostem, zejména ale byly v rozporu se základními fyzikálními zákony. Byly proto hledány jiné výklady. V posledních desítkách let získala důvěru většina geologů i mnoha geofyziků hypotéza „deskové tektoniky“, která hledá zdroje energie pro orogenetické děje v pozvolném pohybu litosférických desek. Posoudíme reálné možnosti tohoto výkladu z různých hledisek.

Energetická závislost

K vyvrátnění pohoří je třeba vykonat určitou přetvárnou práci. K tomu je nutno dodat určité kvantum energie. To by podle hypotézy mohla dodat jediné pohybová energie litosférické desky. Nepružnou srážkou s protější deskou se její pohybová energie proměnila v přetvárnou práci k deformaci hornin. Z principu o zachování energie je zřejmé, že vzájemná srážka nemohla vykonat o nic větší přetvárnou práci, než kolik jí poskytla vzájemná pohybová energie.

Je-li výklad správný, musí být splněna základní fyzikální podmínka: pohybová energie bloku $E = 1/2 m v^2$ musí být rovna přetvárné práci nutné k deformaci hornin v příslušná horská pásma. Vyjádříme obojí veličiny v Nm — joulech (J) ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$).

Pohybová energie afrického bloku: při ploše (včetně šelfů) $40 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, tloušťce 50 km, měrné hmotnosti o 2800 kg/m^3 je celková hmotnost bloku $5,6 \cdot 10^{21} \text{ kg}$. Rychlost (v) můžeme vzít 3,15/rok —

$$\frac{3,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{3,15 \cdot 10^7 \text{ s}} v_A = 10^{-9} \text{ m s}^{-1}, \text{ takže pohybová energie bloku:}$$

$$E_A = 1/2 m v_A^2 = 2,8 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-18} = 2,8 \cdot 10^3 \text{ M m J/}.$$

Celková přetvárná práce A potřebná k vytvoření pohoří bočním tlakem rovná se (nejméně): celková síla bočního tlaku $\times$ dráha této síly při stlačování hornin. Jinak, což je geometricky i mechanicky totéž, celkový deformovaný objem V (m^3) $\times$ měrný tlak na deformovanou plochu $p/\text{N m}^{-2}$: $A = V \cdot p$.

Protože nám jde jen o informativní (řádové) hodnoty, stačí počítat pouze s přibližně odhadnutými hlavními rozměry pohoří:

Alpy: délka	900 km / $9 \cdot 10^5 \text{ m}$
šířka	150 km / $1,5 \cdot 10^5 \text{ m}$
výška střední	10^3 m ,

z čehož vychází objem deformované hmoty $v_A = 135 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$.

Boční měrný tlak musí nejméně přesahovat pevnost v tlaku hornin. Protože převážnou část zemské kůry tvoří žula a čedič, můžeme za pevnost dosadit $p = 2 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Z toho vychází minim. deformační práce pro vytvoření alpského masívu: $A_A = 2,7 \cdot 10^{22} \text{ J}$.

Jak je zřejmé, je tato hodnota 10^{19} krát větší (slovy: deset triliónkrát), než mohla poskytnout pohybová energie afrického bloku.

¹ Nad Krocínkou 65, 190 00 Praha 9

Pohybová energie indické desky a přetvárná práce k vyvrásnění Himálaje: v tomto případě vychází ještě větší nepoměr.

Indický blok o ploše asi $4 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, tloušťce 50 km a měrné hmotnosti $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$ má hmotnost $5,6 \cdot 10^{20} \text{ kg}$. Jeho předpokládaná rychlost je asi 10 cm za rok. Podobným výpočtem jako v předchozím případě obdržíme jeho pohybovou energii $2,8 \cdot 10^5 \text{ J}$, tj. stejnou jako pro africký blok.

Porovnejme ji s deformační prací nutnou pro vytvoření masívu Himálaje o délce 2500 km, průměrné šířce asi 300 km a střední výšce asi 3000 m. Z toho vychází objem horského masívu $V_H = 2,25 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$. Měrný tlak pro žulu a čedič je stejný, jak bylo dříve uvedeno, takže minimální potřebná přetvárná práce $A_H = 4,5 \cdot 10^{25} \text{ J}$, tj. $1,6 \cdot 10^{20}$ krát více, než by byla pohybová energie indického bloku.

Unášení litosférických bloků konvekčními proudy

Kromě hypotézy o nárazové kolizi bloků byla navržena její alternativa: Nepřetržitým pomalým prouděním hmoty ve vnějším zemském plášti mají být litosférické bloky unášeny, a tak tlačeny navzájem proti sobě. Tím by se pozvolna zdvihala nová horská pásma.

Mezi horní hranicí svrchního pláště a vlastní kůrou — litosférou — je viskózní vrstva — astenosféra, v níž se podstatně snižuje rychlost seizmických vln. Z toho se soudí, že část materiálu hornin po hranicích velkých krystalových zrn je již ve stavu počátečního tavení. V ní plovou vnitřní části krystalů o vyšší teplotě tání za daného tlaku. Tato část hmoty je tedy určující pro viskozitu vrstvy. Rozsah astenosféry určují seizmologové asi od hloubky 75 km do 150 km, tedy tloušťku vrstvy asi 75 km.

Pomalý pohyb ve svrchním plášti může být přenášen na spodní plochu bloků jen touto viskózní vrstvou, ve které dochází k prokluzování. Síla, která může být takto přenesena, je dána smykovým napětím σ , které je stejné v celé tloušťce vrstvy a je určeno jednoduchou závislostí: $\sigma = \mu v/y$. Zde μ je součinitel vnitřního tření, zvaný dynamická viskozita, v je rozdíl rychlostí proudění mezi oběma krajními plochami vrstvy (horní a dolní) a y je tloušťka vrstvy. Síla přenášená smykovým napětím σ je tedy tím větší, čím větší je součinitel vnitřního tření μ , a naopak tím menší, čím menší je rozdíl rychlostí proudění ve vrstvě a čím větší je tloušťka vrstvy.

Smykové napětí σ vyjadřujeme v tomto vzorci v N/m^2 , rychlost v v m/s a tloušťku vrstvy y v m . Pak dynamická viskozita má fyzikální rozměr Ns/m^2 . Její hodnota v astenosféře je pravděpodobně asi taková jako hodnota skla změkklého teplotou před počátkem tavení. Ve stupnici Englera ji můžeme odhadnout nejvýše na 1000° E . Přepočtovými vztahy dostáváme, že $1000^\circ \text{ E} = \mu = 42 \text{ N s/m}^2$. Je to 42 000krát větší vnitřní tření než u vody, kde $\mu = 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$.

Předpokládáme, že pod africkým kontinentem by ve vnějším plášti tekla proud rychlostí ne několik centimetrů, ale 1 m za rok, pohyb pevninského bloku je proti tomu velmi pomalý, takže můžeme brát tuto rychlost jako rozdíl rychlostí mezi horní a dolní plochou v astenosféře — $v = 1/3,15 \cdot 10^7 \text{ m/s}$. Dosazením těchto hodnot do výše uvedeného vzorce dostáváme $\sigma = 18 \cdot 10^{-12} \text{ N/m}^2$. Při ploše afrického kontinentu (včetně šelfů) $F = 40 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$ je celý blok unášen silou $F \cdot \sigma = 720 \text{ N}$.

Nehledě k tomu, že tak pranepatrná síla by se zcela ztratila již bočním třením o sousedící bloky, počítejme, jakým měrným tlakem by působila volně plovoucí Afrika jen na svrchní vrstvy zemské kůry o tloušťce 20 km (které se asi podílejí na stavbě horských pásem) a v délce 2000 km, tedy na plochu průřezu $4 \cdot 10^{10} \text{ m}^2$. Měrný tlak $p = 720 \text{ N} / 4 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 = 1,8 \cdot 10^{-12} \text{ N/m}^2$, to je řádově stotmilionkrát méně než tlak mírného vánku na svislou plochu.

Deformace a morfologie litosférických desek

Vedle hledisek energetických, silových a pevnostních, která jsou nakonec rozhodující, je třeba posoudit hypotézu deskové tektoniky ještě z hlediska možných deformací, trhlin, jejich tvaru a průběhu — v případě, že by skutečně byly k dispozici síly (energie) dostatečné velikosti (tj. asi 10^{16} až 10^{18} krát větší, než nyní snad existují), tak aby byly schopné způsobit deformaci na deskovém rozhraní. Litosférické desky jsou poměrně tenkostěnné plošné útvary (sférické), které by měly na sebe působit tak velikými silami, že by docházelo k jejich porušení trvalými deformacemi nebo trhlinami. To záleží na vlastnostech materiálu, jak dalece je plasticky tvárný nebo křehký. Podle některých domněnek by se také mohl podsvouvat jeden deskový blok pod druhý, což však již zcela odporuje jak fyzikálním možnostem, tak pozorovaným skutečnostem.

Nejpravděpodobnější by byly smíšené případy, kdy by nejprve docházelo k plastickým deformacím a pak by vznikaly trhliny, které by se dále rozvířaly. Deformace by musely probíhat především v nejbližších pásmech po obou stranách styku stlačovaných desek. Bylo by to pěchování materiálu spojené s výškovým vrásněním a roztlačováním do stran. Později by vznikaly trhliny ve směrech největšího smykového napětí pod úhlem asi 45° ke směru hlavního tlakového napětí. To jsou obecně známé poznatky nauky o pevnosti a deformacích, používané i v geofyzice. Styková čára mezi evropským a africkým kontinentem by musela probíhat dnešním Středozemním mořem. Neshledáváme tam však ani na dosti podrobných mapách mořského dna žádné podobné útvary, které by mohly vzniknout tlakovou deformací. Naopak, Gibraltarská úžina je na v. straně uzavřena nedeformovaným půlkruhovým pohořím, prořezaným jen úzkým sedlem průlivu. Ve v. oblasti Středomoří probíhá více než půlkruhové pásmo ostrovů, lemuujících na J i na S Egejské moře, propojené horskými pásmy v Řecku. Zvlášť pozoruhodný je hlubokomořský příkop po vnější straně tohoto kruhového oblouku. Jmenované útvary by nikterak nemohly předpokládanou tlakovou deformaci přetrvat, dokonce už by z ní nemohly vzniknout. Tím méně by v hlubokém vnitrozemí, asi 1 000 km severněji odtud, mohly vyrůstat kruhové oblouky horských pásem Alp a Karpat. A další zvlášť otázkavá: čím by byl evropský kontinent držen, či tlačěn proti africkému bloku, aby mezi oběma mohly vůbec vzniknout ohromné síly, které by byly schopny vytvořit tlakovou deformaci mohutná horská pásma?

Diskuse

Bylo by možno uvést ještě řadu dalších, touto hypotézou nezodpověditelných otázek. Uvedené výsledky by měly být náležitě přesvědčivé, aby ukázaly holou nemožnost hypotézy o vyvrásnění pohoří kolizí litosférických bloků. V podané formě nejsou však snad dosti názorné. Vidíme-li, že pohybová energie bloků je 10^{19} až 10^{20} krát menší než deformační práce nutná k vytvoření pohoří, dá to jistě představu ohromného nepoměru. Názornější bude však několik porovnání:

Poměr $1:10^{18}$ je poměr jednoho zrníčka o objemu 1 mm^3 k ohromné krychli o hraně 1 km. V případě Alp jde tedy o poměr tohoto zrníčka 1 mm^3 k deseti kilometrovým krychlím. V případě Himálaje je nepoměr ještě větší: milimetrové zrnko ke 160 kilometrovým krychlím.

Pohybovou energii obou litosférických bloků jsme vyčíslili na 2 800 Nm (J). To je však hodnota práce, kterou vykoná člověk o hmotnosti 70 kg tím, že vystoupí do výšky 4 m. Sotva by některý geofyzik souhlasil, že tato velikost práce by stačila k vyvrásnění Alp či dokonce Himálaje.

Spočítejme si ještě, jak mohutné pohoří o délce 2 000 km by se dalo (teoreticky ovšem) vyvrásnit onou energií, tj. deformační prací 2 800 Nm. Podle výše uvedeného vzorce pro přetvárnou práci $A = p \cdot V$... objem $V = A/p$. Vyčíslením dostáváme objem $V = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ (tj. 14 cm^3). Při délce pohoří $2 \cdot 10^6 \text{ m}$ bude jeho průřez $7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ čili $7 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$ (tj. slovy sedm miliardtin mm^2). Při běžném trojúhelníkovém průřezu by to byl horský hřeben o délce 2 000 km, avšak o šířce 7 tisíciny mm a výšce 2 tisíciny mm.

Naproti tomu můžeme vyčíslit, jakou rychlostí by se musel indický blok pohybovat, aby měl potřebnou kinetickou energii, stanovenou výše pro vyformování Himálaje.

Ze vzorce pro pohybovou energii $E = 1/2 m v^2$ a dosazením hodnot výše vypočtených: $E_H = 4,6 \cdot 10^{23} \text{ J}$ a $m_I = 5,6 \cdot 10^{20} \text{ kg}$ dostáváme pro potřebnou rychlost hodnotu $v_I = 40 \text{ m/s}$, tj. 144 km/h. To by byla rychlost auta po dálnici. Tím však naprosto nemá být řečeno, že nárazem bloku touto rychlostí by mohlo vzniknout něco podobného skutečnému himálajskému horstvu.

K podanému kritickému rozboru byla též vyslovena námitka, že je uvažován jen jednotlivý náraz. Ten ale mohl být snad mnohokrát opakován. Posudme reálnost této námitky. Již v úvodu bylo řečeno, že srážka nemůže vykonat větší deformační práci, než kolik jí dodá pohybová energie. Výpočet ukázal, že přetvárná práce k vyvrásnění Himálaje byla řádově 10^{20} krát větší než pohybová energie při předpokládaném nárazu indické desky. Připusťme i to, že rychlost jednotlivých nárazů by mohla být i 10krát větší, než se uvádí. Pak by energie každého nárazu byla 100krát větší a uvedený nepoměr by byl jen 10^{18} . Tolikrát by tedy musela indická deska narazit uvedenou zvýšenou energií na asijský kontinent, aby vykonala potřebnou deformační práci. Spočítejme jednoduše, s jakou frekvencí by se nárazy musely opakovat, aby děj proběhl asi za 30 miliónů let, což je déle než od poslední orogeneze. Rok má $3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$, tj. za 30 miliónů let $= 10^{15} \text{ s}$. Jak je zřejmé, musela by indická deska fukat frekvencí $10^5/\text{s}$ (tisíckrát za sekundu), aby vykonala potřebnou práci.

Závěr

Těchto několik příkladů ukazuje názorněji než suchá mluva čísel naprostou neudržitelnost výkladu orogenetických dějů hypotézou blokové tektoniky. Probíraný příklad je však i velmi zajímavým dokladem, co všechno světová odborná veřejnost dokáže nekriticky přijmout. Zároveň vidíme, jak je prospěšné ověřit si vůbec možnost nějaké hypotézy třeba jen jednoduchým výpočtem, než o ní začneme psát a předložíme ji veřejnosti.

Předloženo 26. 5. 1983, přijato 21. 5. 1984

Poznámka recenzenta: Předkládaný model vychází z recentních údajů o pohybech africké a indické desky, proto je předkládané výpočty nutno brát pouze jako řádové hodnoty. Rovněž deformační práce je posuzována jako okamžitý jev pro celé pohoří a neuvažuje postupně narůstající destrukci po jednotkách menšího objemu. I tak práce poukazuje na některé nevyjasněné body deskové tektoniky, jako je např. problém, čím byla držena Evropa vůči pohybující se Africe, apod. Z metodického hlediska je významný kvantitativní přístup k problematice.

Petr Rajlich